



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

공학석사학위논문

Copula를 이용한 하천가뭄의 빈도분석:
지속기간-심도

Frequency Analysis of Streamflow Drought Using Copula:
Duration-Severity

2012년 8월

서울대학교 대학원

건설환경공학부

송재열

초 록

가뭄은 물 부족으로 인해서 발생하는 재해로 인간사회와 자연환경에 큰 영향을 준다. 일반적으로 강수량이 부족하면 기상학적 가뭄, 유량이 부족하면 수문학적 가뭄, 그리고 토양수분이 부족하면 농학적 가뭄으로 구분된다. 가뭄은 홍수와 비교했을 때 광범위한 지역에 대하여 영향을 미치며 그 피해도 크게 나타난다. 이러한 가뭄의 분석은 수자원 관리에 있어서 이수, 치수, 그리고 수질 및 환경과 관련이 있으며 치수에 있어서 중요하다.

가뭄에 대한 연구는 가뭄의 정의, 빈도분석, 새로운 지수 개발, 그리고 모니터링을 이용한 예측 등이 있으며 오래동안 진행되어 왔다. 특히, 최근에는 copula를 이용하여 홍수와 가뭄의 극치현상 빈도분석을 하는 연구가 진행되고 있다. Copula를 이용한 다변량 빈도분석은 가뭄의 지속기간과 심도가 확률변수로 고려되고, 주변 누가분포함수들을 이용하여 결합 누가분포함수를 구할 수 있는 장점이 있다. 이러한 이유로 본 연구에서는 가뭄의 지속기간과 심도에 대해 copula를 이용한 이변량 빈도분석을 하고, 저수량 빈도분석과 비교하는데 목적이 있다.

수문학적 가뭄의 범주에서 빈도분석을 수행하기 위해 남한강 상류의 4개 지점 관측소의 유량 자료를 이용하였으며, 가뭄 지속기간과 가뭄 심도를 산정하기 위해 월단위의 유량자료를 표준화하였기 때문에 표준화된 심도를 다룬다. 가뭄 지속기간과 표준화된 가뭄 심도의 산정을 위해 절단수준법과 pooling procedure를 이용하였다. 산정된 가뭄 지속기간과 표준화된 심도의 확률분포형을 결정하기 위해 Chi-square 검정,

Kolmogorov-Smirnov 검정, 그리고 Anderson-Darling 검정을 이용하여 7가지 확률분포형에 대해 적합도 검정을 수행하였다. 4개 지점에서 가뭄의 지속기간에 대해서는 Pareto와 GEV 분포가 선택되었고, 가뭄의 표준화된 심도에 대해서는 lognormal과 GEV 분포가 선택되었으며, L-moment를 이용하여 확률분포형의 매개변수를 추정하였다.

Copula의 선정은 Akaike Information Criterion을 이용하였고, copula 매개변수는 IFM을 이용하여 추정하였다. 4개 지점에 대해서 가뭄의 지속기간과 표준화된 심도의 결합 누가분포함수와 주변 누가분포함수를 구하였으며, 이에 상응하는 재현기간을 계산하였다. Copula를 이용하여 구한 가뭄 지속기간이 주어졌을 때 표준화된 가뭄 심도의 조건부 재현기간과 저수량 빈도분석의 재현기간을 비교하였다. 저수량 빈도분석은 지속기간을 매개변수로 고려하고, copula를 이용한 이변량 빈도분석은 지속기간을 확률변수로 고려하는 차이가 있다. 또한 저수량 빈도분석은 강도, 지속기간, 그리고 빈도의 관계를 보여주는데, 강도는 심도로 비교하기 위해 심도, 강도, 그리고 지속기간의 관계를 이용하여 계산한다. 저수량 빈도분석의 재현기간은 Copula를 이용한 빈도분석의 조건부 재현기간과 비교했을 때, 지속기간 10 ~ 12개월과 표준화된 심도 2.5 ~ 3.5를 기준으로, 가뭄의 지속기간과 표준화된 심도가 짧거나 작은 경우에 재현기간이 길게 산정되는 경향을 보이며, 지속기간과 심도가 길고 큰 경우에 재현기간이 짧게 산정되는 경향을 보인다.

실제로 연구적용 지역에 심한 가뭄피해가 2008년에 있었다. 이론적인 계산으로 4개 지점에서 발생한 가뭄사상을 비교한 결과, 동일한 기간에 발생한 가뭄이 있었으며, 지속기간이 12개월이었으며, 표준화된 심도의 평균이 3.24로 나타났으며, 이를 근거로 Copula를 이용한 가뭄의 지속기간과 표준화된 심도를 동시에 고려한 재현기간을 이용한 결과 약 70

년 빈도의 가뭄으로 계산되었다.

Copula를 이용한 이변량 빈도분석은 저수량 빈도분석과 비교했을 때, 진행 절차면에서는 다소 복잡하지만 좀 더 과학적인 재현기간을 구할 수 있다. SDF (Severity-Duration-Frequency) 곡선은 copula를 이용한 조건부 재현기간을 이용하여 구하였으며 저수량 빈도곡선과 비교하였다. SDF 곡선을 이용하여 가뭄의 지속기간과 심도에 대해 좀 더 타당한 재현기간을 얻을 수 있으며, SDF 곡선은 수공구조물의 설계, 하천환경의 보전 및 생활·공업·농업용수의 안전한 취수를 위한 최소 유량의 보장에 이용된다.

주요어: copula, 수문학적 가뭄, 빈도분석, 지속기간, 심도

학번: 2010-20947

목 차

초 록	i
목 차	iv
표 목차	viii
그림 목차	ix
기 호	xi
약 어	xviii
1. 서론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구목적 및 내용	2
1.3 연구동향	4
1.3.1 가뭄의 빈도분석 관련 국외 연구동향	7
1.3.2 가뭄의 빈도분석 관련 국내 연구동향	12
1.3.3 그 외 가뭄 관련 국외 연구동향	16
1.3.4 그 외 가뭄 관련 국내 연구동향	19
2. 이론적 배경	24
2.1 가뭄의 정의	24
2.2 절단수준법	27
2.2.1 절단수준의 선정	28
2.2.2 가뭄 지속기간과 심도의 산정	30

2.2.3 Pooling procedures	31
2.3 경향성 분석	34
2.3.1 Hotelling-Pabst 검정	35
2.3.2 Mann-Kendall 검정	36
2.4 표준화된 유량	37
2.5 가뭄 지속기간과 심도의 확률분포형	38
2.5.1 확률분포형 적용	38
2.5.2 적합도 검정	39
2.5.3 최우도추정법	42
2.5.4 L-moment	43
2.6 저수량 빈도분석	44
2.6.1 유황 곡선	44
2.6.2 저수량 빈도 곡선	44
2.7 Copula	45
2.7.1 Copula의 기본 이론	45
2.7.2 Copula의 정의와 Clayton copula의 유도	46
2.7.3 Copula의 종류와 선정	52
2.7.4 Copula 매개변수 추정	55
2.8 가뭄 재현기간	57
2.8.1 재현기간	57
2.8.2 결합 확률(joint probability)을 이용한 가뭄의 재현기간	60
2.9 SDF (Severity-Duration-Frequency) 곡선	63
 3. 적용 대상 및 연구 방법	 65
3.1 적용 대상	65

3.2 연구 방법	68
3.2.1 가뭄의 지속기간과 심도의 계산	68
3.2.2 가뭄 지속기간과 심도의 확률분포형 결정	70
3.2.3 일변량 빈도분석	71
3.2.4 저수량 빈도분석	71
3.2.5 Copula를 이용한 이변량 빈도분석	72
3.2.6 SDF (Severity-Duration-Frequency) 곡선	73
4. 적용 결과	74
4.1 가뭄의 지속기간과 심도의 계산	74
4.1.1 경향성 분석과 표준화	74
4.1.2 절단수준의 선정	74
4.1.3 가뭄의 지속기간과 심도	77
4.2 가뭄 특성의 확률분포형 결정	78
4.2.1 적합도 검정	78
4.2.2 매개변수 추정	89
4.3 Copula	97
4.3.1 Copula의 선정	97
4.3.2 가뭄 지속기간과 심도의 결합 누가분포함수	97
4.4 가뭄의 재현기간	99
4.4.1 일변량 빈도분석	99
4.4.2 저수량 빈도분석	102
4.4.3 Copula를 이용한 이변량 빈도분석	102
4.5 본 연구와 실제 가뭄의 비교	115
4.6 SDF (Severity-Duration-Frequency) 곡선	117

5. 결론 및 향후 과제	122
5.1 결론	122
5.2 향후 과제	123
Appendix A. Figures of monthly streamflow data	125
Appendix B. Tables of goodness of fit tests	129
Appendix C. Tables of drought return periods	141
참고문헌	161
Abstract of Thesis	178
감사의 글	182

표 목차

Table 1.1 Comparison of frequency analysis	5
Table 1.2 Advantages and disadvantages of frequency analysis	6
Table 1.3 Status of current drought frequency analysis related studies in foreign journals	8
Table 1.4 Status of current drought frequency analysis related studies in Korea	13
Table 2.1 Properties of distributions used is this study	40
Table 3.1 Details of measurement sites and length of streamflow data	66
Table 4.1 Trend analysis using linear regression, Hotelling-Pabst, and Mann-Kendall test	75
Table 4.2 Calculated values of monthly streamflow and threshold levels for this study	76
Table 4.3 Streamflow drought events and their duration and severity	79
Table 4.4 Basic statistics of streamflow and droughts	83
Table 4.5 Ranking of the distribution for drought duration and drought severity	88
Table 4.6 Estimated parameters of distributions	90
Table 4.7 AIC values and estimated copula parameter	98
Table 4.8 Return periods defined separately by drought duarion and standardized drought severity	103
Table 4.9 Return periods of the historical drought event which occurred in 2008	118

그림 목차

Figure 2.1	Propagation of drought through the hydrological cycle (modified from Stahl, 2001)	26
Figure 2.2	Fundamental parameters of the runs of a series (Dracup et al., 1980a)	29
Figure 2.3	A definition sketch of drought events (modified from Pandey et al., 2008)	32
Figure 3.1	Study area	67
Figure 3.2	Procedure of the study	69
Figure 4.1	Scatter plot of observed drought duration and standardized drought severity	85
Figure 4.2	Comparison of the observed drought duration and the fitted distribution - Jucheon	93
Figure 4.3	Comparison of the observed standardized drought severity and the fitted distribution - Jucheon	93
Figure 4.4	Comparison of the observed drought duration and the fitted distribution - Jeongseon 2	94
Figure 4.5	Comparison of the observed standardized drought severity and the fitted distribution - Jeongseon 2	94
Figure 4.6	Comparison of the observed drought duration and the fitted distribution - Pyeongchang	95
Figure 4.7	Comparison of the observed standardized drought severity and the fitted distribution - Pyeongchang ...	95
Figure 4.8	Comparison of the observed drought duration and the fitted distribution - Yeongwol 1	96
Figure 4.9	Comparison of the observed standardized drought severity and the fitted distribution - Yeongwol 1	96
Figure 4.10	Contours of joint probability for drought duration and standardized drought severity	100

Figure 4.11 Low flow frequency curve of standardized drought severity	104
Figure 4.12 Return period of bivariate drought duration and standardized drought severity T_{DS}	106
Figure 4.13 Return period of bivariate drought duration and standardized drought severity T'_{DS}	108
Figure 4.14 Conditional return period of drought duration given standardized drought severity exceeding various values	111
Figure 4.15 Conditional return period of standardized drought severity given drought duration exceeding various values	113
Figure 4.16 Comparison of the drought events of the studied sites	116
Figure 4.17 Drought SDF (Severity–Duration–Frequency) curves ...	119

기 호

Latin Uppercase

A^2	A-D 검정방법의 통계량(statistics of A-D test)
$C(u, v)$	확률변수 U, V 의 누가분포함수에 대한 코플라 (copula for CDF of random variable U, V)
$C(F_D(d), F_S(s))$	가뭄 지속기간과 심도의 누가분포함수에 대한 코플라 (copula for CDF of drought duration and severity)
$C(F_X(x), F_Y(y))$	확률변수 X 와 Y 의 누가분포함수에 대한 코플라 (copula for CDF of random variable X and Y)
D	가뭄의 지속기간(drought duration)
D_i	i 번째 가뭄의 지속기간(i th drought duration)
D_H	고수량의 지속기간(duration of high flow)
D_L	저수량의 지속기간(duration of low flow)
$E(L)$	가뭄발생 예상기간(expected drought interarrival time)
$F_D(d)$	가뭄 지속기간 D 의 누가분포함수 (CDF of drought duration D)
$F_{D, S}(d, s)$	가뭄 지속기간 D 와 심도 S 의 결합 누가분포함수 (joint CDF of drought duration D and severity S)
$F_0(x)$	표본 자료의 누가분포함수(CDF of sample data)
$F_S(s)$	가뭄 심도 S 의 누가분포함수(CDF of drought severity S)
$F_X(x)$	확률변수 X 의 누가분포함수(CDF of random variable X)
$F_Y(y)$	확률변수 Y 의 누가분포함수(CDF of random variable Y)
$F_{X, Y}(x, y)$	확률변수 X, Y 의 결합 누가분포함수 (joint CDF of random variable X and Y)
H	Hotelling-Pabst 검정의 통계량(Statistics of Hotelling-Pabst test)

$L(\theta)$	θ 의 우도 함수(likelihood function of θ)
M_H	고수량의 강도(magnitude of high flow)
M_L	저수량의 강도(magnitude of low flow)
N	자료의 수(number of data)
$N_{D, s}$	다음에 발생할 가뭄사상의 지속기간과 심도가 각각 이전 가뭄사상보다 크거나 같을 때까지의 가뭄사상 수(number of drought events until the next drought duration and severity gets bigger or equal to the previous drought event)
$R(x_i)$	i 번째 자료 x_i 의 순위(Rank of the i th series data x_i)
S	가뭄의 심도(drought severity), Mann-Kendall 검정의 통계량(statistics of Man-Kendall test)
S_H	고수량의 심도(severity of high flow)
S_L	저수량의 심도(severity of low flow)
S_i	i 번째 가뭄의 심도(i th drought severity)
T	재현기간(return period)
T_D	가뭄 지속기간의 재현기간(return period of drought duration)
T_{DS}	가뭄 지속기간이 d 를 초과하고 동시에 가뭄 심도가 s 를 초과하였을 때의 재현기간(return period of drought duration exceeding d and drought severity exceeding s)
$T_{D, s}$	다음번에 발생할 가뭄사상의 지속기간과 심도가 각각 d, s 보다 크거나 같은 가뭄이 발생할 때까지의 가뭄 발생빈도(drought frequency of drought events until the next drought duration and severity gets bigger or equal to the previous drought event)
$T_{D S > s}$	가뭄 심도가 s 보다 큰 경우의 가뭄 지속기간에 대한 조건부 재현기간(conditional return period of drought

	duration given drought severity exceeding s)
T_i	i 번째 가뭄과 $i+1$ 번째 가뭄사이의 기간 (drought inter-event duration between the i th and $i+1$ th drought event)
T_L	저수량 빈도분석에 의한 재현기간 (return period by low flow frequency analysis)
T_S	가뭄 심도의 재현기간(return period of drought duration)
$T_{S D>d}$	가뭄 지속기간이 d 보다 큰 경우의 가뭄 심도에 대한 조건부 재현기간(conditional return period of drought severity given drought duration exceeding d)
T'_{DS}	가뭄 지속기간이 d 를 초과하거나 가뭄 심도가 s 를 초과하였을 때의 재현기간(return period of drought duration exceeding d or drought severity exceeding s)
V_i	i 번째 가뭄사상의 부족용량 (drought deficit volume of the i th drought event)
$V(s)$	Mann-Kendall 검정의 분산(variance of Mann-Kendall test)
X	확률변수(random variable)
X_i	순차적인 자료에서 i 번째 자료(i th data of a sequential data)
$X_{i:n}$	표본크기가 n 인 i 번째 순서통계량 (i th order statistics of sample size n)
X_0	절단수준(threshold level)
Y	확률변수(random variable)
Z	표준정규변량(standardized variance)

Latin Lowercase

$c(F_X(x), F_Y(y))$ 확률변수 X, Y 의 확률밀도함수에 대한 코플라
(copula for PDF of random variable X, Y)

d	가뭄의 지속기간 D 의 값(value of the drought duration D)
d_i	i 번째 가뭄의 지속기간 D_i 의 값(value of the i th drought duration D_i)
d_{pool}	공동관리되는 가뭄 지속기간(pooled drought duration)
e_i	i 번째 자료군의 자료수(number of data of i th group)
$e_j (= np_j)$	확률분포의 j 번째 구간의 이론도수 (theoretical frequency of the j th interval of the probability distribution)
$f_D(d)$	지속기간 D 의 확률밀도함수(PDF of drought duration D)
$f_{D,S}(d, s)$	가뭄 지속기간 D 과 심도 S 의 결합 확률밀도함수 (joint PDF of drought duration D and severity S)
$f_S(s)$	심도 S 의 확률밀도함수(PDF of drought severity S)
$f_X(x)$	확률변수 X 의 확률밀도함수(PDF of random variable X)
$f_Y(y)$	확률변수 Y 의 확률밀도함수(PDF of random variable Y)
$f_{X,Y}(x, y)$	확률변수 X, Y 의 결합 확률밀도함수 (joint PDF of random variable X and Y)
l_i	i 번째 가뭄사상이 다시 발생하는데 걸리는 기간 (i th drought inter-arrival time)
m	m 번째 값보다 작은 자료의 수 (number of data which values are less than the m th value)
m_i	i 번째 가뭄 강도 M_i 의 값 (value of the i th drought magnitude M_i)
n	자료의 수(number of data), 자료군의 수(number of data groups)
n_j	관측 자료의 j 번째 구간에 대한 표본 관측도수 (frequency for the j th interval of sample data)
p_c	심도의 부족량과 초과량의 임계비율 (critical ratio of low severity and high severity)
p_i	i 번째 유량에 대한 비초과확률

	(non-exceedence probability for the i th streamflow)
p_j	구간내 특정 기각치를 만족하는 모의변수확률 (value which satisfy a specific critical value in the interval)
q	유량/Chi-square, K-S 검정법의 통계량 (streamflow/statistics of Chi-square and K-S test)
q^α	K-S 검정법의 한계치(critical value of K-S test)
q_0	유량의 절단수준(threshold level of streamflow)
q_{\min}	최저 유량(minimum streamflow)
s	가뭄 심도 S 의 값(value of the drought severity S)
s_i	i 번째 가뭄의 심도 S_i 의 값 (value of the i th drought severity S_i)
s_{pool}	공동관리되는 가뭄의 심도(pooled drought severity)
t_c	사전에 정의한 가뭄사이의 기간 한계 (limit of pre-determined drought inter-event duration)
t_i	i 번째 가뭄과 $i+1$ 번째 가뭄사이의 기간 T_i 의 값 (value of drought inter-event duration between the i th and $i+1$ th drought event T_i)
$u (= F_X(x))$	확률변수 X 의 누가분포함수의 값 (value of the CDF of random variable X)
$v (= F_Y(y))$	확률변수 Y 의 누가분포함수의 값 (value of the CDF of random variable Y)
v_i	i 번째 가뭄사상의 부족용량 V_i 의 값 (value of the drought deficit volume of the i th drought event V_i)
x	확률변수 X 의 값(value of the random variable X)
x_i	i 번째 자료(i th data)
$x_{i,j}$	j 번째 년도 i 번째 월의 유량

	(streamflow of the i th month, j th year)
x_{st}	표준화된 유량(standardized streamflow)
y	확률변수 Y 의 값(value of the random variable Y)
y_t	M-K 검정의 시계열 자료 (time series data of M-K test; $t = 1, 2, \dots, N$)
$y_{t'}$	M-K 검정의 시계열 자료 (time series data of M-K test; $t = t' + 1, t' + 2, \dots, t' + N$)
z_i	i 번째 가뭄사상의 부족용량비 (ratio of deficit volume in the i th drought event)
z_k	M-K 검정의 새로운 시계열 자료(new time series data of M-K test)

Greek Lowercase

α	형상 매개변수(shape parameter), 유의수준(significant level)
β	크기 매개변수(size parameter)
γ	위치 매개변수(location parameter)
θ	매개변수(parameter)
θ_c	코플라 매개변수(copula parameter)
κ	왜곡도(skewness)
λ_r	r 번째 순서통계량의 기대값 (expected value of the r th order statistics)
μ	평균(mean)
μ_i	i 번째 월 유량의 평균(average streamflow of the i th month)
ν	자유도(degree of freedom)
σ	표준편차(standard deviation)
σ_i	i 번째 월 유량의 표준편차 (standard deviation of the i th month's streamflow)

τ_2	L-변동계수(L-coefficient of variation)
τ_3	L-왜곡도(L-skewness)
τ_4	L-첨도(L-kurtosis)
$\phi(t)$	copula 발생기(copula generator)

약어

ADI	Aggregated Drought Index
A-D test	Anderson-Darling test
AIC	Akaike Information Criterion
AMS	American Meteorological Society
AP	Area Probability
ARMA	AutoRegressive Moving Average
CDF	Cumulative Distribution Function
DARMA	Discrete AutoRegressive Moving Average
DFI	Drought Frequency Index
DSI	Drought Severity Indice
EDI	Effective Drought Index
ENSO	El Nino Southern Oscillation
EOF	Empirical Orthogonal Functions
FAO	Food and Agriculture Organization
GCM	General Circulation Model
GEV	Generalized Extreme Value
GIMS	national Groundwater Information Management and Service center
GRACE	Gravity Recover And Climate Experiment
GRI	Groundwater Resource Index
HadRM3	Hadley centre Regional climate Model
IC	Inter-event time and volume Criterion
IFM	method of Inference Function for Margins
JDI	Joint Deficit Index

K-S test	Kolmogorov-Smirnov test
MA	Moving Average
MCAR	Multi-variate Contemporaneous AutoRegressive
MLE	Maximum Likelihood Estimation
MSE	Mean Squared Error
MSWSI	Modified Surface Water Supply Index
PCA	Principal Component Analysis
PDF	Probability Density Function
PDO	Pacific Decadal Oscillation
PDSI	Palmer Drought Severity Index
PHDI	Palmer Hydrologic Drought Index
RPDSI	River and Palmer Drought Severity Index
RPPM	Rectangular Pulsus Poisson process Model
SA	Standardized Anomaly
SAF	Severity-Area-Frequency
SMI	Soil Moisture Index
SOI	Southern Oscillation Index
SPEI	Standardized Precipitation Evapotranspiration Index
SPI	Standardized Precipitation Index
SST	Sea Surface Temperatures
SWAT	Soil and Water Assessment Tool
SWSCI	Standardized Water Supply Capacity Index
SWSI	Surface Water Supply Index
VDE	Virtual Drought Exercise
VIC-3L	Variable Infiltration Capacity model - 3 Layers
WAWAHAMO	Wald WAsser HAushalts MOdell
WEB-DHM	Water and Energy Budget-based Distributed Hydrological Model

WGA	Western Governors' Association
WMO	World Meteorological Organization
WSCl	Water Supply Capacity Index

1. 서 론

1.1 연구배경

하천 가뭄은 장기적인 물 부족 현상으로 인간의 생활, 사회 그리고 환경에 큰 영향을 미치는 자연현상이며 재해이다. Dracup 등(1980a, b)은 가뭄의 특성을 제시하였는데, 이는 지속기간(duration, D), 심도(severity, S), 그리고 강도(magnitude, M)이다. 물이 너무 많아서 발생하는 홍수와 달리 물이 부족하여 발생하는 가뭄은 순간적인 강도 보다는 강도와 함께 얼마나 오래 지속되었는지에 따라 영향을 미치며, 그 피해는 홍수와 비교하였을 때 절대 미약하지 않으며, 광범위하다(Western Governors' Association; WGA, 2004). 이러한 가뭄의 분석과 예측은 수자원 관리에 있어서 중요한 요소가 되며, 많은 연구가 진행되고 있다.

가뭄은 수문학적 요소인 강수량, 하천수, 토양수분, 지하수위, 저수지 등의 물 부족으로 발생하는데, Dracup 등 (1980a)은 이러한 다양한 종류의 물부족 현상을 가뭄에 적용하여 강수량이 부족하면 기상학적 가뭄(meteorological drought), 토양수분이 부족하면 농학적 가뭄(agricultural drought), 그리고 하천수가 부족하면 수문학적 가뭄(hydrological drought)으로 분류하였다. Wilhite와 Glantz (1985), AMS (American Meteorological Society, 2004)는 가뭄을 4 가지(기상학적 가뭄, 수문학적 가뭄, 농학적 가뭄, 사회경제학적 가뭄)로 분류하였다.

가뭄의 특성인 지속기간, 심도, 그리고 강도는 서로 상관관계가 있으며, 다양한 시간적 공간적 분포를 보여주기 때문에 가뭄 특성의 복잡한 종속관계를 정량적으로 분석을 하기 위해서는 다양한 특성들의 정보를 동시에 다루어야만 한다.

1.2 연구목적 및 내용

Copula를 이용한 빈도분석 방법은 기존의 빈도분석 방법과 비교하였을 때, 유용한 측면을 많이 보이기 때문에 강우 빈도해석, 홍수 빈도해석 등 다양한 분야에 활용되고 있다. 본 연구는 (1) 수문학적 가뭄에 기반을 두고, 남한강 상류 유역의 4개 지점을 대상으로 가뭄의 특성인 지속기간(duration)과 심도(severity)에 대해 copula를 이용한 이변량 빈도분석을 하고, (2) 기존의 빈도분석 방법 중 저수량 빈도분석 방법과 copula를 이용하지 않는 이변량 빈도분석 방법을 copula를 이용한 이변량 빈도분석의 결과와 비교하고, (3) copula를 이용한 이변량 빈도분석 결과를 실제 적용지역의 가뭄현상과 비교하고 SDF (severity-duration-frequency) 곡선을 구하는데 목적이 있다.

하천 가뭄에 대한 연구를 진행하는데 있어서 가뭄을 정의하는 여러 가지 방법들이 있겠지만, 하천 가뭄의 원인인 도시화, 불투수면적의 증가 등의 원인보다는 원천적인 원인인 물 부족에 그 관심을 집중하고, 가뭄의 원인보다는 가뭄의 영향을 해석하기 위해 하천 가뭄의 개념을 수문학적 가뭄과 관련지어 연구를 진행하기 위해 유량 자료를 사용한다 (Dracup 등, 1980a).

가뭄이라는 재해의 특성상 월단위(monthly) 유량을 이용하여 연구를 수행하며, 월단위 유량 자료의 경향성을 확인하고, 표준화(standardize)를 통해 계절성을 고려한다. Threshold level은 월별 유황곡선의 75%에 해당하는 값 Q_{75} 를 사용한다. 가뭄사상, 가뭄의 지속기간(duration), 심도(severity)를 threshold level을 이용하여 구하고, 가뭄의 지속기간과 심도에 대해 상관관계를 확인한다.

가뭄의 지속기간과 심도는 가뭄에 있어서 중요한 특성이다.

Threshold level을 이용하여 구한 가뭄의 지속기간과 심도를 normal distribution, lognormal distribution, gamma distribution, exponential distribution, generalized extreme value (GEV) distribution, Pareto distribution, Weibull distribution에 각각 적용하여 가뭄의 지속기간과 심도에 적합한 확률분포형을 결정한다. 각각의 확률밀도함수, 누적분포함수의 적합도 검정을 위해 goodness of fit test 중에서 Chi-square test, Kolmogorov-Smirnov test, Anderson Darling test를 이용한다. 확률분포형의 매개변수추정은 maximum likelihood estimation (MLE)와 L-moment를 이용한다.

관측된 가뭄의 지속기간과 심도를 가장 잘 묘사하는 확률분포형이 결정 되었으면, copula를 이용하여 가뭄의 지속기간과 심도에 대해 결합 누적분포함수를 구하여 가뭄의 재현빈도를 구하고, 가뭄의 특성을 분석한다. Copula는 종류가 다양하고 그 함수와 확률변수 값이 어떻게 나오느냐에 따라 가뭄의 재현빈도는 달라질 것이다. Copula의 선정은 Akaike information criterion (AIC)을 이용하여 그 적합도를 검정하여 선택하며, copula의 매개변수 추정은 MLE와 method of Inference Function for Margin (IFM)을 이용하여 추정한다. 선정된 copula와 추정된 매개변수, 가뭄의 지속기간, 가뭄의 심도를 이용하여 결합 누적분포함수를 형성할 수 있으며, 가뭄의 지속기간과 심도에 대한 이변량 빈도분석을 수행하고 기존의 빈도분석 결과와 비교, SDF 곡선을 구한다.

1.3 연구동향

Table 1.1은 각각 가뭄의 재현기간을 산정하기 위한 빈도분석의 방법과 그 변량인 지속기간과 심도의 관계에 대해 보여주고 있고, Table 1.2에서는 각각 빈도분석 방법의 장단점에 대해 기술하였다.

가뭄의 재현기간을 계산하기 위해 빈도분석을 수행하는데, 가뭄의 지속기간과 심도에 대해 이변량 빈도분석을 하기 전에는 일변량 빈도분석을 하였다. 일변량 빈도분석 방법은 지속기간(D)과 심도(S)가 서로 독립인 확률변수이기 때문에 각각 가뭄의 지속기간과 심도에 대한 재현기간을 계산할 뿐, 지속기간과 심도를 동시에 고려하지 못하는 단점이 있다. 이변량 빈도분석 방법은 가뭄의 지속기간과 심도를 동시에 고려할 수 있는 방법으로 가뭄의 지속기간(D)과 심도(S)가 서로 독립이 아닌 확률변수이며, 일변량 빈도분석의 지속기간과 심도를 동시에 고려하지 못하는 한계를 해결해 준다. 저수량 빈도분석 방법은 일변량 빈도분석 방법과 이변량 빈도분석 방법의 중간 단계 정도로 볼 수 있다. 저수량 빈도분석 방법에서 지속기간(D)과 심도(S)가 서로 독립이 아니며, 심도는 확률변수(random variable)이지만 지속기간은 매개변수(parameter)이다. 이변량 빈도분석 방법과 저수량 빈도분석 방법은 일변량 빈도분석 방법과 비교하였을 때 지속기간과 심도를 동시에 고려하기 때문에 가뭄의 재현기간을 계산하는데 가뭄의 특성을 잘 반영한다.

그러나 저수량 빈도분석 방법은 지속기간(D)이 확률변수가 아닌 매개변수이기 때문에 지속기간에 대한 특성을 이변량 빈도분석 방법에 비해 잘 보여주지 못하는 한계를 보인다. 이변량 빈도분석 방법은 지속기간과 심도가 각각 독립이 아닌 확률변수이기 때문에 일변량 빈도분석 방법과 저수량 빈도분석 방법 보다 가뭄의 특성을 잘 반영하지만, 지속기간과

Table 1.1 Comparison of frequency analysis

Types of frequency analysis	Variables		Frequency F
	Severity S	Duration D	
univariate frequency analysis	random variable	random variable	result
	independent		
low flow frequency analysis	random variable	parameter	result
	dependent		
bivariate (multivariate) frequency analysis	random variable	random variable	result
	dependent		
bivariate (multivariate) frequency analysis based on copula	random variable	random variable	result
	dependent		
trivariate (multivariate) frequency analysis based on copula	random variable	random variable	result
	dependent		

Table 1.2 Advantages and disadvantages of frequency analysis

	Advantage	Disadvantage
univariate frequency analysis	– calculation procedures are simple	– can not consider the other random variable
low flow frequency analysis	– have flexible results than univariate frequency analysis	– has limits on considering duration D as a parameter, not as a random variable
bivariate (multivariate) frequency analysis	<ul style="list-style-type: none"> – considers duration D and severity S as random variables – have flexible results than the univariate frequency analysis 	<ul style="list-style-type: none"> – uses the same type of PDF (CDF) for the random variables – calculation procedures are complex
bivariate (multivariate) frequency analysis by copula	<ul style="list-style-type: none"> – considers duration D and severity S as random variables – PDF (CDF) of random variables can be different – have flexible results than the other frequency analysis – calculation procedures are simple than bivariate frequency analysis 	–

심도의 결합 누가분포함수(확률밀도함수)와 주변 누가분포함수(확률밀도함수)를 이용하여 가뭄의 재현기간을 계산하는데 있어서 지속기간과 심도가 같은 형태의 확률분포형을 가진다.

Copula는 결합 누가분포함수(확률밀도함수)와 주변 누가분포함수(확률밀도함수)를 연결해 주는 함수로, 가뭄의 지속기간과 심도의 확률분포형이 각각 다른 형태를 가질 수 있는데, 한가지 형태의 확률분포형으로 분석하는 이변량 빈도분석 방법의 한계를 해결할 수 있다. Copula를 이용한 이변량 빈도분석 방법은 이변량 빈도분석과 같이 가뭄의 지속기간과 심도가 서로 독립이 아닌 확률변수이기 때문에 지속기간과 심도를 동시에 고려하는 이변량 빈도분석 방법의 장점을 그대로 가져오며, 이변량 빈도분석방법의 한계였던 각각의 확률변수에 대해 같은 종류의 확률분포형을 사용하는 한계를 해결해 준다.

1.3.1 가뭄의 빈도분석 관련 국외 연구동향

가뭄에 대한 최근 국외 연구 동향은 Table 1.3에서 볼 수 있다.

Cancelliere와 Salas (2004)는 118년의 월 단위, 주 단위 강우와 유량 자료를 이용하여 SPI (Standardized Precipitation Index)와 PHDI (Palmer Hydrologic Drought Index)를 계산하여 가뭄의 재현기간을 계산하였다. Loaiciga (2005)는 가뭄의 재현기간을 계산하기 위해 유량자료를 복합적으로 재구성하여 빈도분석을 하였다. Peters 등 (2005)은 37년의 기상 자료를 이용하여 1000년의 자료 생성하고, threshold level method를 이용하여 가뭄의 지속기간과 심도를 정의, 가뭄을 performance indicator(성과지표)를 이용하여 분석하였다. Peters 등 (2006)은 유량자료에 동일한(전체 자료의 30% 평균값) 기준을 threshold level으로 선정하여 가뭄의 심도와 지속기

Table 1.3 Status of current drought frequency analysis related studies in foreign journals

Frequency analysis	Author (year)	Type of drought	Period of used data	Used Variables	Applied time series
Univariate	Cancelliere and Salas (2004)	<i>M</i>	120 yrs	duration	SPI
	Loaiciga (2005)	<i>H</i>	84 yrs	duration	annual streamflow
	Peters et al. (2005)	<i>H</i>	37 yrs	severity	monthly streamflow
	Peters et al. (2006)	<i>H</i>	38 yrs	severity	monthly streamflow
	Ghosh and Mujumdar (2007)	<i>M</i>	53 yrs	severity	SPI
	Beersma and Buishand (2007)	<i>M</i>	95 yrs	precipitation deficit	daily rainfall
	Fiorillo (2009)	<i>M</i>	80 yrs	rainfall (used time interval as a parameter)	monthly rainfall
	Tallaksen et al. (2009)	<i>M</i>	37 yrs	duration, average area, deficit volume	SPI
	Lopez-Moreno et al. (2009)	<i>M</i>	60 yrs	magnitude	SPI
	Lorenzo-Lacruz et al. (2010)	<i>M, H</i>	46 yrs	SPEI	SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index)
Bivariate (multivariate)	Hisdal and Tallaksen (2003)	<i>M, H</i>	30 yrs	severity, area	monthly streamflow, monthly rainfall
	Gonzalez and Valdes (2006)	<i>H</i>	87 yrs	duration, severity	annual streamflow
	Nadarajah (2007)	<i>H</i>	110 yrs	duration, modified duration	PDSI
	Yoo et al. (2008)	<i>M</i>	47 yrs	duration, severity	SPI
	Cancelliere and Salas (2010)	<i>H</i>	120 yrs	duration, intensity	annual streamflow
	Bruke and Brown (2010)	<i>M</i>	92 yrs	severity, area	monthly rainfall

M: meteorological drought, *H*: hydrological drought

Table 1.3 Status of current drought frequency analysis related studies in foreign journals (continued)

Frequency analysis	Author (year)	Type of drought	Period of used data	Used Variables	Used data for droughts
Copula	Shiau (2006)	<i>M</i>	70 yrs	duration, severity	SPI
	Shiau et al. (2007)	<i>H</i>	84 yrs	duration, severity	monthly streamflow
	Shiau and Modarres (2009)	<i>M</i>	50 yrs	duration, severity	3-month SPI
	Mirakbabari et al. (2010)	<i>M</i>	48 yrs	duration, severity	monthly rainfall
	Kao and Govindaraju (2010)	<i>M, H</i>	50 yrs	precipitation, streamflow	SPI, Joint Deficit Index (JDI)
	Wong et al. (2010)	<i>M</i>	103 yrs	peak intensity, average intensity, duration (trivariate analysis)	daily rainfall
	Reddy and Ganguli (2011)	<i>M</i>	79 yrs	duration, severity	SPI

M: meteorological drought, *H*: hydrological drought

간에 대해 가뭄의 빈도분석을 수행하였다. Ghosh와 Mujumdar (2007)는 미래 시나리오와 GCM (General Circulation Model)을 통한 시뮬레이션 결과의 불확실성을 고려하여 가뭄에 접근하였고, Beersma와 Buishand (2007)는 시계열 자료의 시뮬레이션과 지역 빈도 분석을 비교하여, 네덜란드의 가뭄을 분석하였다. Fiorillo (2009)는 이탈리아의 대규모 카르스트 용천 지대의 유량과 수문곡선을 구하여 기록된 자료를 분석하고, 수문곡선에서 얻을 수 있는 강우와 용천수 유량의 지연시간을 통해 가뭄이 발생하지 않도록 부족한 강우량을 구하는 연구를 수행하였다. Tallaksen 등 (2009)은 저수지 규모의 가뭄 특성에 대한 연구를 수행하였으며, 37년의 시계열 자료를 이용하여 월단위로 가뭄을 시간적 공간적으로 분석하였다. Lopez-Moreno 등 (2009)은 스페인과 포르투갈의 국경을 넘는 댐의 영향으로 인한 가뭄 분석을 하였고, 가뭄의 지속기간(duration)과 강도(magnitude)는 댐의 상류와 하류의 월단위 유량을 이용하여 계산하였다. Lorenzo-Lacruz 등 (2010)은 SPI와 SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index)를 이용하여 스페인 지역에서 기후변화와 수문순환의 관계를 알아보고, 저수지에서의 유입량, 저류량, 그리고 유출량을 계산하여 기후변화에 따른 가뭄을 연구하였다.

Hisdal과 Tallaksen (2003)은 수문학적 가뭄, 기상학적 가뭄에 대해 SAF (Severity-Area-Frequency) curve를 이용하고, EOF (Empirical Orthogonal Functions) 기법으로 30년 기간의 강우와 유량 자료를 1000년으로 확장하고, 38개 지역에 해당하는 월 강우자료와 15개 지역에 대한 일 유량자료를 가뭄을 분석하였다. Gonzalez와 Valdes (2006)는 DFI (Drought Frequency Index)를 제안하였다. Nadarajah (2007)는 가뭄의 지속기간(drought duration)과 가뭄이 아닌 기간(non-drought duration)을 이변량 감마 모델을 이용하여 분석하였다. Yoo 등 (2008)은 RPPM (Rectangular Pulsus

Poisson process Model)을 이용하여 가뭄의 심도-지속기간-빈도(severity-duration-frequency) 분석을 하고, 강우 자료로부터 얻은 SPI 값을 이용하여 가뭄에 대해 지점과 지역 빈도 분석을 수행하였다. Cancelliere와 Salas (2010)는 관측된 유량 자료의 확률분포에 근거하여 가뭄의 지속기간과 부족용량을 계산하고, DARMA (Discrete AutoRegressive Moving Average) 모형을 이용하여 가뭄의 길이를 구하고, 가뭄의 빈도 분석을 하였다. Burke 와 Brown (2010)은 강우량과 토양 수분을 표준화한 자료를 이용하여 극치분석을 통한 영국의 가뭄을 분석하고, 기후변화에 따른 가뭄의 변화를 예견할 수 있도록 기초 단계 연구를 수행하였다.

Copula는 경제, 재정 분야에 많이 이용되었다(Embrechets 등, 2003; Cherubini 등, 2004). 수문학에 copula를 적용한 것은 오래되지 않았다. De Michele과 Salvadori (2003), Favre 등 (2004), Salvadori와 De Michele (2004a, b), De Michele 등 (2005), Zhang과 Singh (2006), Grimaldi와 Serinoldi (2006), Salvadori와 De Michele (2006), Renard와 Lang(2007), De Michele 등 (2007), Zhang과 Singh (2007a, b, c), Salvadori 와 De Michele (2007), Villarini 등 (2008), Leonard 등(2008), Pinya 등 (2009), Aghakouchak 등 (2010), Wang 등 (2010), Zhang 등 (2011)은 copula를 이용하여 다변량 강우 빈도 분석, 폭우 빈도 분석, 홍수 빈도 분석, 고수위 - 저수위 유량 빈도 분석을 하였다.

가뭄의 빈도분석에 copula를 이용한 연구는 2000년대 중반부터 진행이 되었다. Shiau (2006)은 기상학적 가뭄의 범주에서 SPI (Standardized Precipitation Index)를 이용하여 가뭄을 해석하고, 지속기간(duration)과 심도(severity)를 2-dimensional copulas를 이용하여 계산하고 가뭄의 재현기간을 산정하였다. 그리고 수문학적인 측면에서 copula가 가뭄 변수

들 사이의 상관관계를 보여주는데 간편하다는 이점을 제시하였다. Shiau 등(2007)은 수문학적 가뭄에 범주를 두고 황하 유역에 흐르는 유량을 이용하여 가뭄의 특성을 분석, copula를 이용하여 가뭄을 해석하였다. 가뭄의 지속기간은 감마분포로 표현할 수 있고, 가뭄의 심도는 지수분포로 표현할 수 있다. 서로 다른 변수인 지속기간과 정도의 상관관계를 보기 위해 copula를 이용해 서로 다른 두 분포를 결합하였다. Shiau와 Modarres (2009)는 이란에서의 가뭄 빈도 분석을 하기위해 3개월 단위의 SPI 자료와 copula를 이용하여 SDF (Severity-Duration-Frequency) 곡선을 구하였다. Mirakbari 등 (2010)은 기상학적 가뭄에 범주를 두고 월강우 자료를 이용하였고, 가뭄의 지속기간과 심도 대하여 copula를 이용한 가뭄 빈도 분석을 카자흐스탄 지역에 적용하였다. Kao와 Govindaraju (2010)는 미국의 인디애나주를 대상으로 copula에 기초하여 기상학적 가뭄과 수문학적 가뭄을 연구하고, 새로운 가뭄지수인 JDI (Joint Deficit Index)를 제안하였고, Wong 등(2010)은 기상학적 가뭄에 범주를 두고 강우자료를 이용하였고, peak intensity, average intensity, duration에 대해 Gumbel-Hougaard copula를 이용하여 가뭄을 해석하였다. Reddy와 Ganguli (2011)은 인도에서 기상학적 가뭄에 범주를 두고 6개월 단위의 SPI 자료와 copula를 이용하여 SDF 곡선을 구하고, 가뭄의 빈도 분석을 하였다.

1.3.2 가뭄의 빈도분석 관련 국내 연구동향

가뭄 빈도분석에 대한 국내 연구 동향은 Table 1.4와 같다.

일변량 빈도분석 연구로, 김경덕과 허준행(2000)은 한강유역에 대하여 크기차원과 기간차원으로 구분하여 가뭄해석을 실시하였다. 크기차원에

Table 1.4 Status of current drought frequency analysis related studies in Korea

Frequency analysis	Author (year)	Type of drought	Period of used data	Used Variables	Used data for droughts
Univariate	Kim and Heo (2000)	<i>H</i>	30 yrs	duration, magnitude	daily streamflow
	Yoo et al. (2006)	<i>M</i>	10,000 yrs	severity	SPI
	Lee et al. (2008)	<i>H</i>	87 yrs	duration	monthly streamflow
	Oh et al. (2011)	<i>M</i>	47 yrs	EDI	EDI (Effective Drought Index)
Bivariate (multivariate)	Yoo et al. (2002)	<i>M</i>	200 yrs	duration, threshold level	monthly rainfall
	Yoo and Ryoo (2003)	<i>M</i>	219 yrs	duration, SPI	SPI
	Yoo et al. (2004)	<i>M</i>	200 yrs	duration, SPI	SPI
	Kim and Yoo (2006)	<i>M</i>	94 yrs	duration, severity	SPI
	Yoo and Kim (2006)	<i>M</i>	37 yrs	duration, severity	SPI
	Chang et al. (2006)	<i>M</i>	29 yrs	severity, area	SPI
	Yoo et al. (Yoo, Kim, and Kim; 2010)	<i>M</i>	30 yrs	duration, severity	SPI
	Yoo et al. (Yoo, Choi, and Kim; 2010)	<i>M</i>	30 yrs	duration, severity	SPI
Copula	Kwak et al. (2012)	<i>H</i>	40 yrs	duration, severity	monthly streamflow

M: meteorological drought, *H*: hydrological drought

서는 L-모멘트비 일람도와 적합도 검정을 통하여 대상자료의 적정 확률 분포형으로 gamma-2 분포와 Weibull-2 분포형을 선정하였고, 이를 이용하여 확률저수량 및 확률갈수량을 산정하였으며, 이는 유지수량의 관점에서 필수적이라고 제시하였다. 기간차원에서는 추계학적 모형인 MCAR (Multi-variate Contemporaneous AutoRegressive) 모형을 이용한 모의발생을 통하여 각 연도별, 재현기간별 용수수요에 대한 가뭄특성치인 가뭄기간, 부족량 및 강도를 산정하였으며, 이는 수자원 장기종합 계획에 반드시 필요하다고 제안하였다. 유철상 등(2006)은 SPI 자료를 이용하여 EOF 해석 및 다변량 시계열 모형에 적용하여 재현기간별 최대가뭄심도를 구하였으며, 이와 더불어 우리나라 각 대권역의 댐 유효저수량과 농경지 면적을 이용하여 농업가뭄 대비능력을 평가하였다. 평가결과, 재현기간 30년 가뭄에 대비할 수 있는 이수능력을 갖춘 유역은 한강유역이 유일하다고 판단되었으며, 영산강 유역은 큰 농경지 면적에 비해 저수용량이 크게 부족한 것으로 파악되어 가뭄대비에 취약함을 제시하였다. 이광만 등(2008)은 수자원 평가를 위한 장기 가뭄 수문시나리오를 한강 수계의 저수지 시스템을 대상으로 개발하여, 갈수 분포모형과 비교하여 합성 유량계열이 주어진 재현기간 내에서 신뢰성 있는 장기가뭄빈도와 이에 해당하는 가뭄시나리오 개발에 이용할 수 있음을 제시하였다. 오탈석 등(2011)은 경계핵밀도함수를 이용하여 가뭄 빈도분석을 실시하였다. 가뭄지수를 과거에 실제로 발생했던 가뭄사상과 비교함으로써 가뭄을 판단하는데 기상학적 가뭄지수를 효과적으로 이용할 수 있다고 밝혔고, 산정된 가뭄지수를 경계핵밀도함수를 이용하여 빈도분석을 실시함으로써 가뭄의 재현기간을 산정하고 이를 미래에 발생가능한 가뭄을 전망하는데 활용할 수 있다고 하였다.

유철상 등(2002)은 서울지점의 월 강수량 자료에 나타난 가뭄의 장기

재현특성에 대해 살펴보았다. 기상학적 가뭄 인자인 강수량을 이용하였으며, 자료의 불충분함, 100년 이하의 강수기록의 단절을 보완하기 위해 조선시대에 사용되었던 측우기의 기록을 활용하여 약 200년간의 월 강수 자료를 이용하였다. 유철상과 류소라(2003)는 서울지점 월 강수량 자료에 나타난 가뭄의 재현 및 지속특성을 분석하고, 포아송 과정을 적용하여 비교하였다. 포아송 과정을 거쳐 가뭄의 재현 및 지속특성을 정량화하기 위해 절단수준을 포아송 과정을 따르는 수준으로 결정하였으며, 그 결과 포아송 과정과 절단수준을 이용한 분석이 가뭄의 재현 및 특성을 잘 설명하고 있음을 보여주었다. 유철상 등(2004)은 포아송 과정을 이용한 가뭄의 공간분포 분석을 하였으며, 포아송 과정을 이용한 가뭄의 정량화는 관측 기록이 짧은 경우에 유리하다고 제시하였다. 또한, 지점별 관측기록의 길이가 크게 다른 경우 모형에 의한 가뭄의 공간적 특성 파악이 단순히 관측자료를 이용한 경우에 비해 우월할 수 있다고 확인하였다. 김대하와 유철상(2006)은 유철상과 김대하(2006)가 제시한 구형펄스 모형을 이용한 가뭄심도-지속기간-재현빈도 해석 방법을 적용하여 전국 59개 지점에 대해 분석을 수행하였고, 이를 통해 남한전체 가뭄심도의 공간분포를 해석하였고, 분석결과는 가뭄이 발생했을 때 각 지점별로 어느 정도 크기를 갖게 되는 지를 파악하는데 이용될 수 있으며, 가뭄지수는 강수 부족량으로 곧 바로 연결될 수 있으므로 어느 정도의 물이 부족할 것인지 예측하는데 도움이 될 것이라고 제시하였다. 장연규 등(2006)은 강우 자료를 이용하여 SPI를 산정하고, 이를 EOF 분석을 실시하여 공간적으로는 Kriging 기법을, 시간적으로는 ARMA (AutoRegressive Moving Average)를 이용하여 가뭄 SAD (Severity-Area-Duration) 곡선을 작성하여 가뭄상황에 따른 피해규모를 산정하고자 하였다. 이렇게 제작된 SAD 곡선은 가뭄발생시 가뭄에 대한 다각적인 정보를 제공할 수 있다고 판단

되어 가뭄의 피해 예측과 사전대책 마련에 있어서 유용하게 쓰일 수 있을 것이라고 제안하였다. 유지영 등(2010)은 군집분석과 이변량 확률분포를 이용하여 가뭄빈도분석을 실시하였다. 군집분석을 수행하여 지역별 빈도분석을 보다 신뢰성 있게 수행할수 있도록 가뭄 자료의 길이가 길어져 지점빈도분석의 한계를 완화시켰으며, 가뭄해석시 지속기간(duration)과 심도(severity)가 단변량 해석이 아닌 이변량 해석을 수행하여 가뭄 지속기간과 재현기간의 변화에 따른 가뭄 심도가 군집지역별로 상이하고, 가뭄발생의 취약지역을 발견하는데 도움이 된다는 것을 제시하였다. 그러나 가뭄빈도분석을 하는데 강우량만을 고려하여 가뭄을 정의(기상학적 가뭄)하였기 때문에 가뭄 분석의 효율성을 높이기 위해서는 수문학적 가뭄을 분석할 수 있는 하천유량 또는 저수유량과 농업적 가뭄을 나타낼 수 있는 토양수분과 같은 인자가 함께 고려되어야할 필요성을 제시하였다.

국내 copula 관련 연구로, 곽재원 등(2012)은 남한강 상류와 평창강 유역을 대상으로 수문학적 가뭄을 정의하고 copula 이론을 이용하여 수문학적 가뭄의 결합 확률 분포를 유도하였다. 월 평균 유량을 절단 수준으로 이용하였으며, 가뭄의 지속기간과 심도의 확률분포형을 결정하는데 있어서 경험적으로 잘 맞는 Weibull distribution과 2변수 gamma distribution을 사용하였다. 실제 가뭄을 모의하기 위해 적합한 절단수준의 도출을 향후 과제로 제시하였다.

1.3.3 그 외 가뭄 관련 국외 연구동향

가뭄의 분석을 위해 다양한 지수를 이용 혹은 새로운 지수를 제안한 연구로 Cordery와 McCall (2000)은 SOI (Southern Oscillation Index), SST

(Sea Surface Temperatures)와 같은 지수와 강수 사이의 관계와 예보 기술을 이용하여, 1년 앞을 내다보고 가뭄을 예보할 수 있다는 연구를 보였다. Fowler와 Kilsby (2002)는 DSIs (Drought Severity Indices) DSI_3 , DIS_6 를 이용하여 가뭄을 정의하고 Weather-type Index로 가뭄의 심도를 분류하여 Yorkshire 지역의 가뭄을 분석하였다. Keyantash와 Dracup (2004)은 강수, 증발산, 하천수, 저수지 저류량, 토양수분, 적설량을 동시에 고려하는 ADI (Aggregated Drought Index)를 제안하였다. 수문순환에서 기상학적 가뭄, 수문학적 가뭄, 농학적 가뭄의 적용한계 문제를 해결하기 위해 PDSI (Palmer Drought Severity Index), SWSI (Surface Water Supply Index) 등을 이용하였다. Mendicino 등 (2008)은 GRI (Groundwater Resource Index)를 지중해성 기후지역에 적용하고, 스펙트럴 분석으로 GRI와 SPI를 비교하여, GRI가 가뭄을 모니터링하고 예보하는데 유용함을 보였다. Kim 등 (2009)은 200년간의 EDI (Effective Drought Index)와 SPI를 비교하여 가뭄 지수를 결정하였고, 지속기간이 짧고 긴 가뭄에 대해 EDI가 SPI보다 효과적이고 유용함을 보였다. Jaranilla-Sanchez 등 (2011)은 기상학적, 수문학적, 농학적 가뭄을 분석하기 위하여 강수량, 유량, 지하수, 그리고 토양수분을 자료로 이용하였으며, SA (Standardized Anomaly) index를 계산하고, WEB-DHM (Water and Energy Budget-based Distributed Hydrological Model)을 이용하여 월별 계절별 가뭄 특성을 분석하고, 수문학적 매개변수들이 쌀 생산에 미치는 영향을 연구하였다.

가뭄을 분석하기 위해 다양한 모형과 기법이 이용되었는데, Zierl (2001)은 WAWAHAMO (WAld WAsser HAushalts MOdell) 모형을 이용하여 스위스 전 지역의 숲에 토양수분, 증발산, 적설, 저류 등의 자료를 이용하여 가뭄에 대해 적용하여, 복합적인 물 균형을 다루는 모형인 WAWAHAMO가 가뭄을 다룰 수 있음을 보였다. Querner와 van Lanen

(2001)은 지하수와 하천수에 대해 유황곡선의 70%에 해당하는 유량을 threshold level로 선정하여 가뭄의 지속기간을 10일로 하여 가뭄을 분석, SIMGRO (SIMulation of GROund water and surface water levels) 모델을 이용하여 도시화로 인한 가뭄의 영향을 분석하였다. Moreira 등 (2006)은 가뭄의 심한 정도를 4개의 등급으로 나누어 SPI를 이용, loglinear model을 이용하여 총 67년의 자료를 3개 구간으로 나누어 분석하면서, 가뭄과 기후변화의 영향에 관한 연구를 수행하였다. Ochoa-Rivera (2008)은 추계학적 인공 신경망에 근거한 비선형 다변량 모델을 이용하여 유량 자료를 생성하고 가뭄을 분석, AR(2)를 이용하여 결과를 비교하였다. Moreira 등 (2008)은 loglinear 모델을 이용하여 SPI에 근거한 가뭄을 예측하는 연구를 하였고, loglinear 모델을 이용한 가뭄의 예측이 짧은 기간의 가뭄 예보에 유용하다는 결론을 냈다. Ozger 등 (2009)은 wavelet transform, 상호상관, 크리깅, ENSO (El Nino Southern Oscillation)과 PDO (Pacific Decadal Oscillation)에서 제공하는 공간구조를 이용하여 가뭄을 저주파를 이용하여 연구하였다. Kasprzyk 등 (2009)은 다목적 물 포트폴리오 계획(many-objective water portfolio planning)을 이용하여 텍사스 지역을 대상으로 증가하는 인구의 수요와 가뭄으로 인한 도시지역의 상수도 시스템의 위험 요소에 대한 연구를 하였다. Tang과 Piechota (2009)는 VIC-3L (Variable Infiltration Capacity model - 3 Layers)을 이용하여 콜로라도 주 상류 유역의 50년간 토양수분을 생성하고 가뭄을 분석하였으며, 토양수분과 PDSI, 강우량, 그리고 유량을 비교하여 토양수분이 극한 기후의 지표로 사용 가능 여부를 결정하였다. Leblanc 등 (2009)은 GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment)를 이용하여 구한 자료를 해석하여 수문 순환의 물 부족과 가뭄의 발생에 대해 연구를 하였으며, 지하수위의 변동과 GRACE를 통해 호주 지역에서 지하수의 지속적

으로 감소할 것과 가뭄이 지속될 것을 예견하였다. Santos 등 (2010)은 SPI를 이용하고, PCA (Principal Component Analysis)와 KMC (K-Means Clustering)를 통해 가뭄의 공간적 시간적 변화에 대해 연구를 하였다. Burke와 Brown (2010)은 SAF (Severity-Area-Frequency) 곡선과 AP (Area-Probability) 곡선을 구하고, HadRM3 (Hadley centre Regional climate Model)를 이용하여 주어진 가뭄의 심도에 대한 재현기간을 계산하였다.

가뭄의 예보와 기후변화를 고려한 연구로, Huang과 Yuan (2004)은 대만에서 저수지 가뭄 예정보를 위한 연구를 했으며, Panda 등 (2007)은 가뭄의 영향으로 인한 인도 지역의 지하수 수위를 정량화하기 위한 연구를 수행하였으며, 가뭄이 단순한 자연현상이 아닌 인간의 활동과 기온의 상승과 관련이 있다고 하였다. Barros와 Bowden (2008)은 호주에서 가뭄의 예보에 대한 연구를 수행하였다. Tweed 등 (2009)은 강의 표면수와 염분, 지하수 자료를 이용하여 기후변화를 고려한 호주의 가뭄에 대해 연구를 수행하였다.

그 외에 Wise (2010)는 나이트 자료의 조사를 통해 415년의 유량 자료를 생성하여 미국 서부 지역의 가뭄을 분석하였다. Dunbar 등 (2010)은 미국 텍사스 주에서의 토사유출과 관련한 가뭄과 그에 따른 저수량과 홍수 조절에 대한 연구를 하였다. Price 등 (2011)은 갈수 유량을 근거로 35개 유역에 대해 토지이용과 지형특성이 가뭄에 미치는 영향을 연구하였다.

1.3.4 그 외 가뭄 관련 국내 연구동향

김형수 등(2000)은 절단수준법의 적용을 통해 가뭄을 보다 정량적으로 정의할 수 있었으며, 조건부 확률 개념을 이용하여 한강 유역에서 가

뭍 발생시 그 심도가 더욱 심화될 가능성에 대해 연구하였다. 임경진 등(2001)은 낙동강 유역 전체가 기후학적 동질성을 가지고 있다는 가정을 전제로 하여 가뭄감시지표를 산정하였으며, 이를 통해 PDSI (Palmer Drought Severity Index)가 대상유역의 가뭄지표로 적절함을 제시하였으며, 가뭄을 정량화 할 수 있는 정확한 연구의 필요성을 제안하였다. 류재희 등(2002)은 가뭄을 정량적인 방법으로 해석하기 위하여 가뭄에 영향을 미칠 수 있는 수문인자를 확률적 개념으로 수치화하고, 가뭄을 정량화하는 지수인 PDSI, SWSI (Surface Water Supply Index), 그리고 SPI (Standardized Precipitation Index)를 산정하고 비교하였다. 이를 통해 가뭄대책에 대한 기본정보를 제공하고, PDSI, SWSI, 그리고 SPI가 각각 가뭄을 정량적으로 나타내는데 아주 유효하며, 각각의 지수가 가지는 장·단점을 잘 이용할 경우 가뭄 파악에 효과적일 것이라고 제안하였다. 강인주와 윤용남(2002)은 가뭄 관리를 위한 수문학적 의사결정 방법에 대한 연구를 하였고, 신사철과 김철준(2003)은 가뭄 발생 지역을 판별하기 위해 식생지수의 적용성에 대해 연구를 하였다. 이재응과 유재복(2003)은 안성천 유역을 시범유역으로 하여 가뭄 예·경보 기법을 연구하였다. 널리 사용되고 있는 PDSI가 수문학적 가뭄상태를 반영하지 못하는 한계를 해결하기 위해 PDSI에 하천유량과 저수지의 저류량을 함께 고려한 기상학적, 수문학적 가뭄지수인 RPDSI (River and Palmer Drought Severity Index)를 개발하여 가뭄을 정량적으로 나타내었고, RPDSI가 가뭄을 정량적으로 나타내는데 유효함을 보였다. 이동률 등(2004)은 기후변화가 기상학적 가뭄에 미치는 영향을 연구하였다. 이재응과 김영아(2004)는 효율적인 저수지 운영방안의 모색을 위하여, 가뭄 예·경보 시스템을 사용하여 기존 저수지 운영률과 방류계수를 사용한 저수지 운영을 수행한 결과를 비교하였다. 가뭄 예·경보의 지표를 작성하기 위해 수문학적,

기상학적 가뭄지수인 RPDSI 값을 이용하였으며, 임의로 정한 예·경보 기준을 보완하기 위해 각각의 기준을 변화시켜가며 방류계수 값의 변화에 대한 민감도 조사가 필요함을 제시하였다. 권형중 등(2006)은 수문학적 가뭄지수인 SWSI를 보완하여 MSWSI (Modified Surface Water Supply Index)를 개발하여 우리나라의 수문학적 가뭄상태를 표현하는데 있어서 MSWSI가 적합함을 보였다. 이주현 등(2006)은 한반도의 가뭄모니터링 시스템을 구축하기 위해 우리나라 전역에 PDSI, SPI, 그리고 MSWSI 등의 가뭄지수를 월 단위로 산정하였으며 산정된 각종 지수들이 어느 정도로 과거에 발생했던 가뭄을 정량적으로 재현하는가를 분석하고 향후 가뭄의 상황을 전망할 수 있는 가뭄 전망 기법을 개발하였다. 모니터링 결과, 가뭄의 지역적인 상황 및 심도 등을 비교적 정량적으로 재현하지만, 가뭄의 시작과 종료 시간에 있어서는 월 단위의 분석이라는 점에서 정확성이 결여된다고 판단하고 보다 짧은 시간 간격을 갖는 가뭄지수 산정 연구의 필요성을 제기하였다. 이동률 등(2006)은 극심한 기상조건 하에서 각 저수지가 계획된 공급량에 대해 어느 정도 기간 동안 용수를 공급할 수 있는가를 평가할 수 있는 척도인 물공급능력지수(Water Supply Capacity Index, WSCI)를 개발하였고, 기존 가뭄지수인 PDSI, SPI 등과 유사한 기준 하에서 비교 및 이용이 가능토록 표준물공급능력지수(Standardized Water Supply Capacity Index, SWSCI)를 함께 제시하였다. 이를 통해 가뭄기간의 저수지 운영을 위한 의사결정 그리고 용수의 수요와 공급 측면에서 유용한 정보 제공이 가능하다고 제안하였다. 황태하 등(2006)은 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모형을 이용한 토양수분지수 산정과 가뭄감시를 하였다. PDSI가 물순환의 고려없이 기후적인 조건만을 이용하는 단점과 한계성을 극복하기 위해 토양, 토지이용, 기후자료를 입력자료로 하는 준 분포형 장기유출모형인

SWAT 모형을 이용하여 토양수분지수를 산정하고 가뭄을 연구하였으며, 토양수분 결핍에 기초한 토양수분지수가 가뭄감시와 관리를 위해 적용이 가능함을 제시하였다. 경민수 등(2007)은 군집분석을 통해 우리나라를 6개의 군집으로 분류하고 표준강수지수(SPI)를 이용하여 각각의 군집에 해당하는 SAD (Severity-Area- Duration) 곡선을 작성하였다. 집단을 공간적 특성에 따라 분류함으로써 우리나라 가뭄을 공간적 특성에 따라 분석하고자 하였다. 가뭄심도-영향면적-지속기간 관계곡선으로 알려진 SAD 관계곡선은 지속기간이 짧고 영향면적이 작을수록 가뭄심도가 깊어지며 영향면적이 증가할수록 가뭄심도가 낮아진다는 점에서 강우사상에 대한 최대평균우량깊이-유역면적-지속기간의 특성과 일치한다(김보경 등, 2006). 그러나 지속기간이 길고, 면적이 증가할 수록 강도가 낮아지는 강우와 반대로 일반적으로 가뭄은 피해가 클 수가 있다. SAD 관계 곡선의 작성은 가뭄의 시간적 공간적 특성을 고려한 기법이라는 점에서 과거에 발생된 가뭄사상을 보다 더 자세하게 묘사한다는 관점에서 미래의 가뭄 계획을 수립하는 있어서 도움이 될 것이라고 제안하였다. 권형중과 김성준(2007)은 국가 GIMS (National Groundwater Information Management and Service Center)에서 관리하고 있는 국가지하수관측망 자료를 이용하여 금강유역에 대하여 가뭄분포도를 작성하고 가뭄을 평가할 수 있는 지표로서의 활용성을 분석하였다. 양질의 지하수위 자료를 사용한 면에서는 비교적 높은 신뢰도의 가뭄평가가 이루어졌다고는 하였으나 가뭄평가가 지하수 유역에만 국한되고, 지하수위 관측소 자료를 이용하여 비교적 간단한 알고리즘으로 가뭄지도의 작성이 가능하지만 지하수위 자료의 질이 떨어지는 관측소 인근 지역의 가뭄평가 신뢰도가 낮은 단점이 발견되었다. 또한 지하수위 관측 자료가 충분하지 못한 실정을 제시하였다. 연제문 등(2007)은 SPI를 도입하여 가뭄의 여러 가지 특성의 상호관계를 고

려하여 가뭄 특성을 정량화하였는데, 가뭄 관리에 중요한 요소인 가뭄의 심도와 지속기간과의 관계를 감마확률분포를 이용하여 그 재현 특성을 연구하였다. 서로 다른 가뭄 사상의 빈도분석에 있어서 일괄적인 가뭄의 정보를 제공하기 위해 이변수 분포를 사용하였으며, 정량화된 가뭄정보는 수자원 정책 결정자에게 유용한 정보를 제공할 것이라고 제안하였다. 서형덕 등(2008)은 최적의 저수지 운영을 위한 전문가시스템을 개발하여 수문학적 가뭄지수인 MSWSI 값과 저수지 유입량과의 연계를 통한 가상 가뭄모의운영(VDE, Virtual Drought Exercise)을 실시한 후 도출된 결과를 바탕으로 가뭄단계에 따른 댐 운영 대안을 제시하였다. 경민수 등(2009)은 서울 지역을 대상으로 기후변화가 가뭄에 미치는 영향을 연구하였다. 김수영 등(2010)은 기상학적 가뭄지수인 PDSI, SPI와 실제로 측정된 토양수분 자료를 가지고 산정된 SMI (Soil Moisture Index)를 비교 분석하여 각 가뭄지수간의 경향을 파악하였다. 토양수분 자료는 KoFlux 타워에서 관측한 자료를 사용하였는데, 자료가 5년치밖에 되지 않고, 비가 많이 오는 여름이나 추운 겨울에 결측치가 많아 SMI의 정확도가 충분하지 못하다고 판단된다. 김호성 등(2010)은 SAD 곡선을 적용하여 극한가뭄의 시공간적 특성에 대한 기후변화의 영향을 평가하였다. 김호성 등은 국립기상연구소에서 제공하는 지역기후모형의 미래 강수량 산출자료를 이용하였기 때문에 가뭄심화의 원인이 강우 특성의 변화에 기인한 것이 된다고 하였다. 또한 표준강수지수(SPI)를 이용한 분석이기 때문에 유역 물 순환에 있어서 중요한 요소인 유량, 증발산량, 그리고 토양수분이 전혀 고려되지 않아 실제적인 수자원 공급을 고려한 수문학적 가뭄을 평가하는 면에서는 미흡하다고 판단된다.

2. 이론적 배경

2.1 가뭄의 정의

가뭄을 해석하고 분석 결과를 활용하기 위해서는 가뭄이 무엇인지 명료하게 정의를 해야만 할 필요성이 있다. 가뭄은 수문·기상학적 요소와 사회·경제적인 요소들이 서로 다르게 작용하고, 시·공간적으로 그 분포가 다르기 때문에 적절한 가뭄의 정의를 창안하는 것은 매우 난해한 일이며 그 방법이 다양하지만, 가뭄의 분석을 위해 공통적으로 요구되는 결정 사항들이 있다(Dracup 등, 1980a). (1) 가뭄의 주된 원인이 강수량(기상학적 가뭄), 하천유량(수문학적 가뭄), 또는 토양수분(농학적 가뭄)인지를 결정해야하고, (2) 연구를 위한 시계열 자료의 단위를 연단위, 월단위, 또는 일단위를 사용할 것인지를 결정해야하고, (3) 가뭄사상을 다른 사상과 어떤 방법으로 구분할 것인지를 결정해야하고, (4) 연구에서 가뭄의 양상을 어떻게 해석할 것인지를 결정해야한다.

Linsley 등(1959)은 가뭄을 ‘두드러진 강우가 내리지 않는 기간’이라고 하였고, Gumbel (1963)은 가뭄을 ‘연중 일일 최소 유량’이라고 정의하였고, Palmer (1965)는 가뭄을 ‘어느 지역의 수문 상태가 평소와 다르게 변한 것’이라고 하였으며, WMO (World Meteorological Organization, 1975)에서는 가뭄을 ‘오래 지속되는 강수의 부족’이라고 정의하였고, FAO (Food and Agriculture Organization, 1983)에서는 가뭄을 ‘수분 부족으로 흉작이 될 경우’이라고 정의하였고, UN Secretariat General (1994)는 가뭄을 ‘강수량이 평소 기록보다 낮을 때 심각한 수문 불균형과 함께 토지 자원 생산 시스템이 악영향을 주는 자연 현상’이라고 정의하

였고, Schneider (1996)는 가뭄을 ‘지역의 통계를 통한 다년 평균(multiyear mean)과 관계한 강수가 부족한 지속 기간’이라고 정의하였다.

가뭄의 정의를 원인 측면에서 외국에서 연구한 사례들을 살펴보면 다음과 같다. Dracup 등(1980a)은 하천 가뭄이 발생하면 수문학적 요소인 강수량, 하천수, 토양수분, 지하수위, 저수지 등에서 물 부족이 관측되는데, 이러한 다양한 종류의 물부족 현상을 가뭄에 적용하여 강수량이 부족하면 기상학적 가뭄(meteorological drought), 토양수분이 부족하면 농학적 가뭄(agricultural drought), 그리고 하천수가 부족하면 수문학적 가뭄(hydrological drought)으로 구분하였다. Wilhite와 Glantz (1985), AMS (American Meteorological Society, 2004)는 가뭄을 4 가지(기상학적 가뭄, 수문학적 가뭄, 농학적 가뭄, 사회경제학적 가뭄)로 분류하였다. Figure 2.1은 수문순환을 통한 가뭄을 나타내고 있다.

가뭄을 해석하기 위해서는 가뭄의 주된 요소인 강우, 유출, 그리고 토양수분을 모두 통합하여 연구를 해야 하지만, 대부분의 가뭄에 대한 연구들을 살펴보면 가뭄의 양상을 단 하나의 요소에 집중하여 진행되었다(Whipple, 1966; Herbst 등, 1966; Beard와 Kubik, 1972; Gupta와 Duckstein, 1975). 또한, 하천 가뭄의 연구사례를 보면 기상학적 가뭄(meteorological drought)과 수문학적 가뭄(hydrological drought)을 많이 사용했다. 수자원 시스템에 있어서 강수량(precipitation)은 입력(input)값이고, 유량(streamflow)은 출력(output)값이 된다. 그러므로 가뭄의 원인을 규명하고자 하는 연구는 가뭄의 요인을 기상학적 요소인 강수량이라고 판단하며, 가뭄의 영향과 피해를 확인하고자하는 사회과학자, 정치가, 그리고 경제학자들은 가뭄의 원인을 수문학적 요소인 유량, 저수량, 토양수분의 부족이라고 판단하고 연구를 한다.

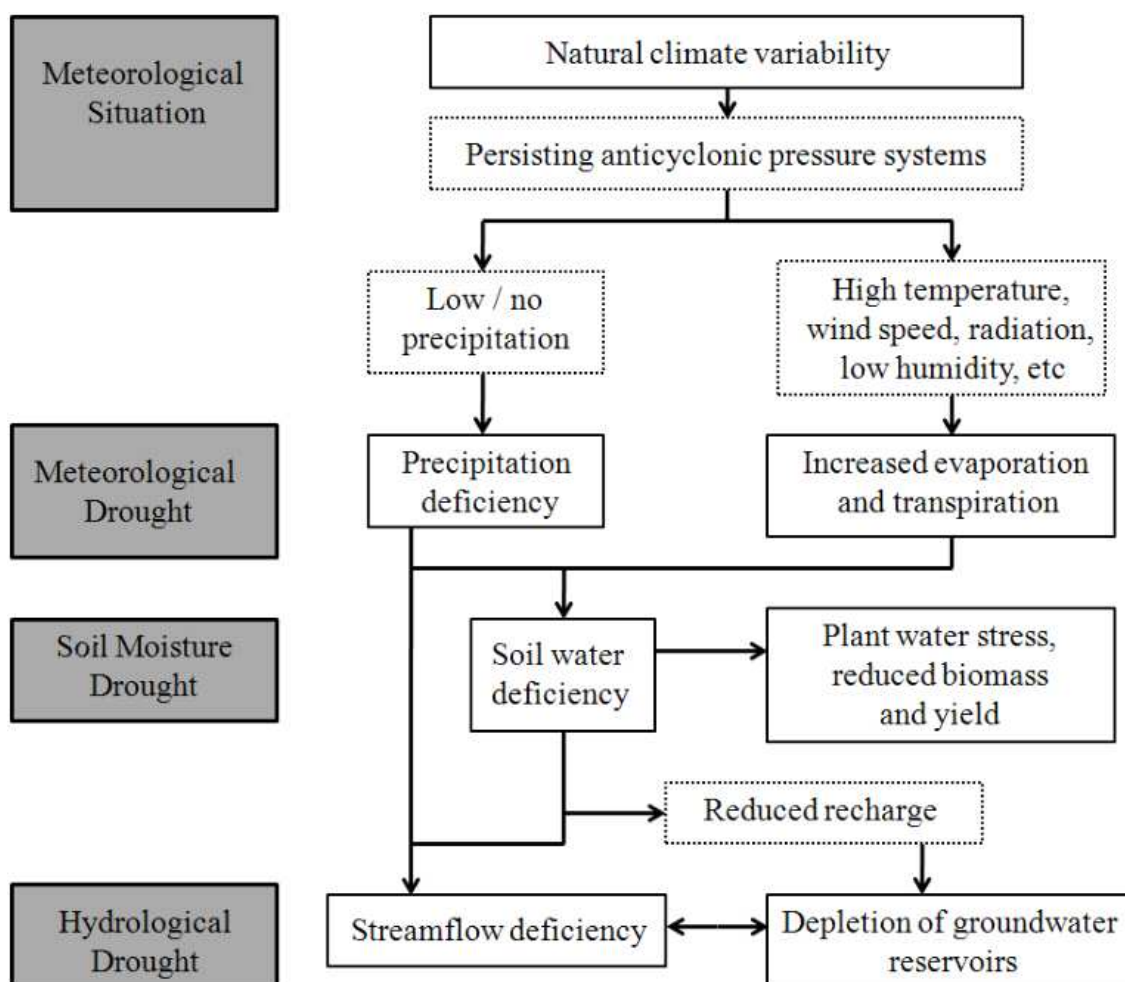


Figure 2.1 Propagation of drought through the hydrological cycle (modified from Stahl, 2001)

U.S. Weather Bureau에서 Havens (1954)는 가뭄(기상학적 가뭄)을 ‘강수량이 부족함이 크고 오랜 시간동안 지속되어 동·식물의 생명에 피해를 주고, 국가적 목적과 발전소 유지를 위한 물 공급량보다 물이 부족한 경우. 특히, 강수량이 풍부한 지역에서 이와 같은 물 부족현상이 보이는 경우.’ 라고 정의하였다. Pinkeye (1966), Santos (1983), Chang (1991), Eltahir (1992)는 기상학적 가뭄을 연구하기 위해 강수량자료를 이용하였다.

Linsley 등(1975)은 수문학적 가뭄에 대해 ‘주어진 수자원 관리 시스템에 하천수의 공급이 불충분한 기간’ 이라고 정의하였다. 수문학적 가뭄 해석을 위해 Dracup 등(1980b), Sen (1980), Zelenhasic과 Salvai (1987), Chang과 Stenson (1990), Frick 등(1990), Mohan과 Rangacharya (1991), Clausen과 Pearson (1995)는 유량 자료를 이용하였다.

농학적 가뭄은 하천수나 강수량에 관계없이 토양수분의 부족으로 인해 식물 혹은 곡물이 잘 자리지 못할 경우로 묘사되고 있다. 이러한 이유로, 가뭄은 특정한 기준에 의한 수요와 공급의 관계를 갖는 물 부족현상으로 정의 할 수 있다(Dracup 등, 1980a).

2.2 절단수준법

Threshold level method (절단수준법)의 원래 명칭은 ‘method of crossing theory’이며, truncation level method이라고도 하며, 일반적으로 주어진 절단수준보다 높고 낮은 유량에 대한 연구를 위해 사용한다. Yevjevich (1967)은 수문학에 통계이론을 기초로 하여 순차적인 시계열을 분석하기 위해 crossing theory를 접목하여 절단수준법을 이용하였다. 이 방법은 수문학적인 측면에서의 수요와 공급 분석에 적절하여 수문학적

설계, 저수지 저장 시스템, 수자원 관리, 물 공급시스템, 농업 관개수 관리 등에서 주로 사용되었다(Tallaksen과 van Lanen, 2004).

Figure 2.2는 절단수준법을 이용하여 유량에 대해 시계열이 특정한 수준 이상 또는 이하로 나뉘는 것을 보여준다. 절단수준 (X_0)을 정함으로써 가뭄을 표현하는 특성인 지속기간(duration), 심도(severity), 그리고 강도(magnitude)를 구할 수 있다. 절단수준을 기준으로 밑에 있는 유량을 저수유량이라고 한다면, 저수유량의 3개 변수인 지속기간 D_L , 심도 S_L , 그리고 강도 M_L 은 식(2.1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_L = M_L \cdot D_L \quad (2.1)$$

2.2.1 절단수준의 선정

절단수준은 물 부족의 유형에 따라 여러 가지 방법으로 그 기준을 선택할 수 있다. 특정 유황은 대상 유역의 실제 유황에 따라 달라질 수 있다. 항상 물이 흐르는 하천의 경우 기준이 유황곡선의 70% (Q_{70}), 90% (Q_{90})가 될 수 있다(Meigh 등, 2002; Hisdal 등, 2004). 하지만 간헐천의 경우 Q_{70} 이 0이 될 수 있다. 남아프리카 공화국의 하천의 경우 평균유량을 기준점으로 하고 있다. Kjeldsen 등(2000)은 월별 유황곡선의 75% (Q_{75})를 제안한 바 있다. Woo와 Tarhule (1994)은 유황곡선의 5% (Q_5), 7.5% ($Q_{7.5}$), 10% (Q_{10}), 12.5% ($Q_{12.5}$), 15% (Q_{15}), 17.5% ($Q_{17.5}$), 그리고 20% (Q_{20}) 총 7 개의 기준점을 남아프리카 지역에 시험해봤고, Tate와 Freeman (2000)은 8 개의 하천 유량 자료를 이용하여 아프리카 지역에 $Q_{12.5}$ 부터 Q_{90} 까지의 기준들을 적용해 보았다. 저수량 분석을 수행하기 위해서

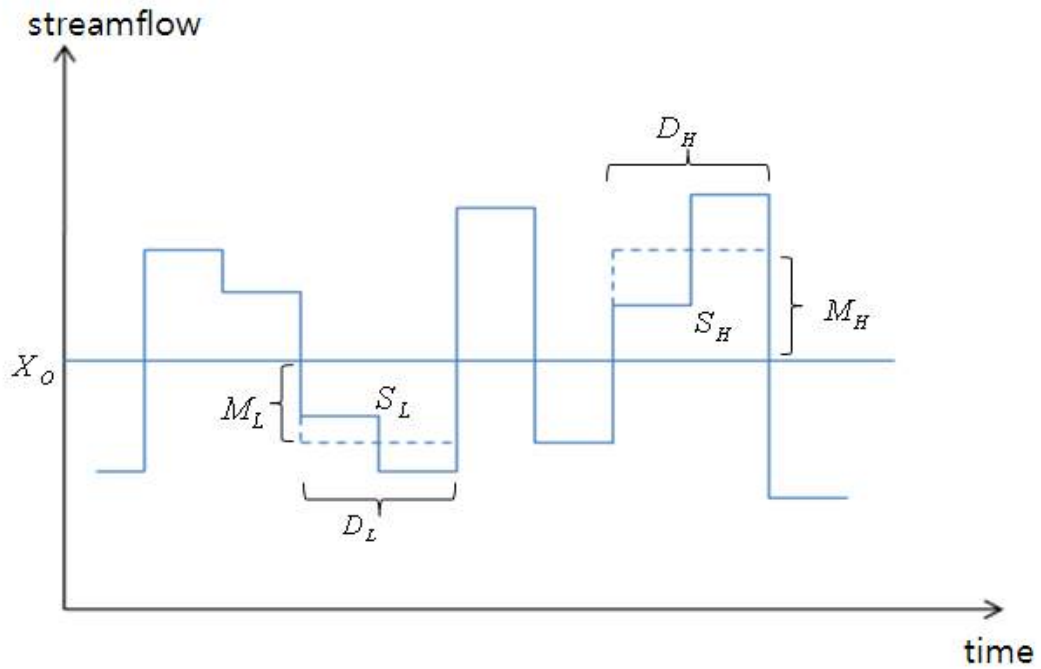


Figure 2.2 Fundamental parameters of the runs of a series (Dracup et al., 1980a): D_H , duration of high flow; D_L , duration of low flow; M_H , magnitude of high flow; M_L , magnitude of low flow; S_H , severity of high flow; S_L , severity of low flow; X_0 , threshold level of a time series.

국내에서는 주로 갈수량에 해당되는 355위 유량(Q_{355})의 10년 평균값(평균 갈수량) 또는 10년 빈도분석 값(기준 갈수량)을 산정하여 사용하고 있으며, 미국 및 영국 등의 국가에서는 7일 지속기간 10년 빈도유량을 주로 사용하고 있다(이길성 등, 2009).

특정 지역의 연구, 가뭄이 오래 동안 지속되는 지역에서는 절단수준을 높게 잡아야 할 것이며, 가뭄 발생이 적은 지역에서는 절단수준을 낮게 잡아야 할 것이다. 절단수준은 고정되거나 시간에 따라 변할 수 있다. 시기별로 유량이 많을 때와 적을 때의 편차를 고려하기 위해 variable threshold level 접근법이 고안되었으며, 이 방법을 이용하여 유량이 많은 시기에 실제 유량이 평수량 보다 적게 흐를 경우가 발생할 경우 가뭄 사상에 중요한 자료가 될 것이다. 그러나 유량이 많은 시기에 기준보다 상대적으로 유량이 적게 흐르는 경우는 하천 가뭄이라고 보기 어렵고 하천수 부족 정도로 봐야 한다(Tallaksen과 van Lanen, 2004).

하천가뭄 빈도분석을 수행하기 위하여 유량이 계절에 따라 풍부하다가 적은 경우를 고려하고, 갈수량에 해당하는 유량을 절단수준으로 선정하면 정의되는 가뭄사상의 경우가 적어 빈도분석을 수행하는데 자료의 양이 부족할 것이라 사료되어 본 연구는, Kjeldsen 등(2000)이 제안한 월별 유황곡선의 75%(Q_{75})를 이용한다. Lee (2000)는 Q_{75} 를 저수량(low flow)으로 정의하였으며, Q_{75} 는 우리나라의 저수량에 해당된다.

2.2.2 가뭄 지속기간과 심도의 산정

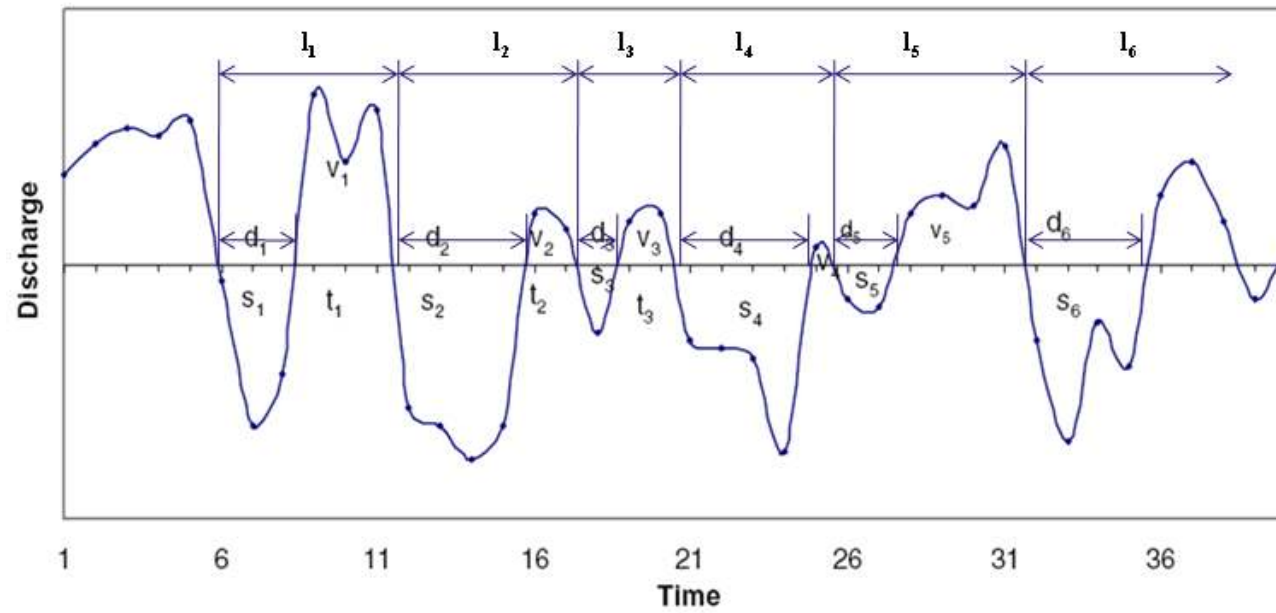
Figure 2.2에서 절단수준법의 기본 원리에 대해 보여줬다면, Figure 2.3은 threshold level method를 이용하여 가뭄사상을 정의하는 것을 보여준다. 가뭄사상의 시작은 threshold level method에 의해 (1) 유량이 threshold

level을 내려가는 순간, (2) 유량이 threshold level을 내려간 순간과 올라간 순간의 평균, (3) 최저유량이 흐른 순간 등으로 구분하여 정의할 수 있다. 본 연구에서는 가뭄사상의 시작과 끝을 threshold level을 기준으로 하여 유량이 threshold level 밑으로 내려가는 부분을 시작으로, 유량 곡선이 threshold level 위로 올라가는 부분을 끝으로 정의하였다.

일단, threshold level X_0 에 해당하는 유량의 절단수준 q_0 가 주어지면, 가뭄의 빈도분석을 위해 필요한 가뭄의 지속기간(drought duration, d_i), 가뭄의 심도(drought severity, s_i), 가뭄 사이의 기간(drought inter-event time, t_i), 가뭄 사이의 초과용량(inter-event excess volume, v_i), 그리고 가뭄이 다시 발생하는데 걸리는 시간(drought inter-arrival time, l_i)을 구할 수 있다. 또한, 최저 유량(minimum flow, q_{\min})을 구할 수 있으며, 지속기간과 심도의 비(ratio)인 가뭄의 강도(drought magnitude, m_i)를 구할 수 있다. 심도는 threshold level에 의해 정의된 가뭄 사상의 부족용량(deficit volume)이라고 할 수 있다.

2.2.3 Pooling procedures

월단위 유량과 truncation level method를 이용하면 가뭄 사상의 시계열을 얻을 수 있다. 각각의 가뭄 사상은 Figure 2.3과 같이 지속기간 d_i 와 심도 s_i , 그리고 가뭄과 가뭄 사이의 기간 t_i 등으로 정의될 수 있다. 각각의 가뭄은 독립사건이므로 공동 관리 방법을 이용하여 가뭄사상의 독립적인 시계열을 묘사하는 것이 다음과 같이 가능하다 (Tallaksen 등, 1997).



d_i = drought duration, s_i = drought severity, t_i = drought inter-event time
 v_i = inter-event excess volume, l_i = drought inter-arrival time

Figure 2.3 A definition sketch of drought events (modified from Pandey et al., 2008)

지속기간이 d_i 와 d_{i+1} 이고 심도가 s_i 와 s_{i+1} 인 가뭄 사이의 기간 t_i 가 사전에 정의된 한계 t_c 보다 작다면 상호 독립인 가뭄사건 간에 다음과 같은 관계가 형성된다(Zelenhasic과 Salvai, 1987).

$$d_{pool} = d_i + d_{i+1} \quad (2.2)$$

$$s_{pool} = s_i + s_{i+1} \quad (2.3)$$

Figure 2.3과 같이 가뭄 사이의 초과 유량 v_i 가 이전의 가뭄 심도 s_i 에 대한 비율이 사전에 정의된 임계 비율 p_c 보다 작다면 공동관리될 수 있다. 이러한 두 방법들은 몇가지 경우에 일관성이 없을 수도 있기 때문에 Madsen과 Rosbjerg (1995)는 식(2.2)와 (2.3)를 동시에 사용하여 (a) 가뭄사건 사이의 시간이 0보다 크고 임계지속기간인 t_c 보다 작거나 같을 경우, (b) 부족량에 대한 초과량의 비율이 임계비율 p_c 보다 작은 경우에 대해 두 개의 가뭄 사건에 대한 공동관리를 제안하였다. 제안된 수식은 (2.4), (2.5)와 같다 (Tallaksen 등, 1997).

$$d_{pool} = d_i + d_{i+1} + t_i \quad (2.4)$$

$$s_{pool} = s_i + s_{i+1} - v_i \quad (2.5)$$

본 연구에서는 위의 두 식(2.4, 2.5)이 사용된다.

Tallaksen 등(1997)은 moving average (MA) procedure, sequent peak algorithm (SPA), 그리고 inter-event time and volume criterion (IC) 3개의 서로 다른 pooling procedures를 비교·설명 하였다. 그 중에서 MA

는 이동평균필터에 시계열 자료를 적용할 때 간편하게 해주며, MA window를 10일로 하여 적용하도록 권장하였다. SPA는 가뭄사상을 선별하는 방법으로 여겨진다. IC는 (a) 발생한 가뭄 사이의 기간 t_i 가 최대 영향을 미치는 가뭄 지속기간 t_{min} 과 같거나 작을 경우와 (b) 발생한 가뭄사상의 심도(부족용량)비 z_i 가 심도(부족용량)가 최대 영향을 미치는 심도(부족용량)비 p_c 와 같거나 작을 경우, 지속기간과 심도(부족용량) 2개의 가뭄특성을 연합하기 위해 이용한다. (a)와 (b)의 조건이 만족하면 연합된 가뭄은 그 다음 가뭄사상과 다시 연합할 수 있고, 식(2.6, 2.7)으로 표현할 수 있다.

$$d_{pool} = d_i + d_{i+1} + t_i \quad (2.6)$$

$$s_{pool} = s_i + s_{i+1} - z_i \quad (2.7)$$

2.3 경향성 분석

수문시계열자료에 대한 경향성 분석은 자료를 도시하여 나타내는 방법과 통계기법을 이용하여 경향을 파악하는 방법이 있다. 분석하려고 하는 수문시계열자료에 경향성 있는 경우, 절단수준법을 이용하여 가뭄사상을 구할 때 자료의 시작부분 또는 끝부분에 큰 가뭄이 생길 우려가 있기에 경향성 분석을 한다. 통계기법을 이용하는 방법으로는 linear-regression 검정, Hotelling-Pabst 검정, Mann-Kendall 검정, Sen 검정 등이 있다. 본 연구에서는 국내에서 주로 사용되는 대표적인 통계적 기법인 linear-regression 검정, Hotelling-Pabst 검정, Mann-Kendall 검정을 사용한다. Linear-regression

검정에 대한 내용은 간단한 분석기법으로 참고서적과 논문에서 쉽게 찾아 볼 수 있으므로 생략하였다.

2.3.1 Hotelling-Pabst 검정

Hotelling-Pabst 검정은 자료수가 N 인 주어진 자료계열을 오름차순으로 정렬한 후 $(x_i (i = 1, 2, \dots, N))$, 다음과 같은 H 를 통계량으로 정의한다.

$$H = \sum_{i=1}^N [R(x_i) - i]^2 \quad (2.8)$$

여기서 $R(x_i)$ 는 자료계열 x_i 의 순위(rank)이다. 이와 같이 정의된 통계량 H 는 근사적으로 평균 μ 와 분산 σ^2 이 다음과 같이 표시되는 정규분포를 따른다.

$$\mu = \frac{N(N^2 - 1)}{6} \quad (2.9)$$

$$\sigma^2 = \left[\frac{N(N^2 - 1)}{6 \sqrt{(N - 1)}} \right] \quad (2.10)$$

통계량 H 가 정규분포를 따르므로 다음과 같이 표준정규변량 Z 를 계산한다.

$$Z = \frac{H - \mu}{\sigma} \quad (2.11)$$

여기서 계산된 표준정규변량 Z 가 다음과 같은 경우 경향성은 가지지 않는 것으로 판정한다.

$$|Z| \leq u_{1-\alpha/2} \quad (2.12)$$

여기서 $u_{1-\alpha/2}$ 는 표준정규분포의 $1-\alpha/2$ 분위수에 해당되는 값이며, α 는 유의수준이다.

2.3.2 Mann-Kendall 검정

전통적인 통계 검정 방법들이 모평균의 분포를 통일한 분산에 대해 정규분포로 가정하고 그 분석을 수행하는데 비하여 Mann-Kendall 검정은 연속적인 모평균을 가진다는 가정 아래 검정분석을 수행한다. 또한 다른 통계학적 검정 기법들이 표본크기, 분산, 왜도와 같은 표본자료 특성에 영향을 받는데 반해 표본자료의 특성에 민감하지 않고 간단하면서도 강력한 기능을 발휘하며, 결측 값이나 감지 한계를 벗어나는 자료에 대해서도 적용이 가능한 장점이 있다.

검정방법은 N 개의 자료를 갖는 시계열 $y_t(t=1, \dots, N)$ 와 $y_{t'}$ ($t=t'+1, t'+2, \dots, t'+N$)을 이용하여 새로운 시계열 z_k 를 다음과 같은 조건으로 생성한다.

$$\begin{aligned} z_k &= 1 && \text{if } y_t > y_{t'} \\ z_k &= 0 && \text{if } y_t = y_{t'} \\ z_k &= -1 && \text{if } y_t < y_{t'} \end{aligned}$$

여기서 $k = (t' - 1)(2N - t')/2 + (t - t')$ 이다. Mann-Kendall의 통계치(S)는

시계열 z_k 의 합으로 나타낸다.

$$S = \sum_{t'=1}^{N-1} \sum_{t=t'+1}^N z_k \quad (2.13)$$

검정 표본의 수가 40을 초과하는 경우의 Mann-Kendall 검정통계량(Z)는

$$Z = \frac{S + m}{\sqrt{V(S)}} \quad (2.14)$$

$$V(S) = \frac{1}{18} \left[N(N-1)(2N+5) - \sum_{i=1}^n e_i(e_i-1)(2e_i+5) \right] \quad (2.15)$$

와 같으며 여기서 m 은 $S < 0$ 인 경우 $m = -1$, $S > 0$ 인 경우 $m = 1$ 의 값을 갖는다. n 은 자료군의 수이고 e_i 는 i 번째 자료군의 자료의 수이다. $|Z| > u_{1-\alpha/2}$ 인 경우 자료가 경향성을 갖고 있음을 의미하며, 여기서 α 는 유의확률을 나타내며, $1-\alpha/2$ 는 표준정규분포의 변위치(quantile)이다. $S=0$ 일 경우, $Z = 0$ 이다.

2.4 표준화된 유량

본 연구에서는 하천가뭄의 빈도분석 수행을 위해 월 단위의 유량자료를 이용한다. Figure 2.3에서 볼 수 있듯이, 절단수준법을 이용하여 월별로 가뭄의 특성을 계산하면 자연스럽게 가뭄의 지속기간과 심도를 구할 수 있는데, 자료의 계절성을 고려 할 수 있도록 식 (2.16)을 이용하여 유

량 자료를 표준화시키면 표준화된 유량(가뭄의 심도)을 얻을 수 있다.

$$(\text{standardized streamflow}) = \frac{x_{i,j} - \mu_i}{\sigma_i} \quad (2.16)$$

여기서 $x_{i,j}$ 는 j 번째 년도의 i 번째 월의 유량이고, μ_i 는 i 번째 월 유량의 평균, 그리고 σ_i 는 i 번째 월 유량의 표준편차이다. 본 연구에서는 절단수준법을 이용하여 가뭄사상을 구하였다. 가뭄의 심도는 유량을 이용하여 구한 값이라고 한다면, 표준화된 가뭄의 심도(standardized drought severity)는 표준화된 유량을 이용하여 구한 값이다.

2.5 가뭄 지속기간과 심도의 확률분포형

2.5.1 확률분포형 적용

통계분야에서는 각종 목적에 따라 수많은 이산형 및 연속형 확률분포형을 개발하여 사용하고 있으며, 수문학에서도 다양한 확률분포형을 이용하여 설계 수문량 산정 등 다양한 용도로 이용하고 있다. 본 연구에서는 통계학적으로 수문분석에 널리 이용하는 확률분포형을 가뭄의 지속기간과 심도에 적용하였다. Normal distribution, lognormal distribution, gamma distribution, exponential distribution, Pareto distribution, Generalized Extreme Value distribution, Weibull distribution을 가뭄의 지속기간과 심도에 적용하여 보았다. Table 2.1은 각각의 분포형의 확률밀도함수(PDF), 누적분포함수(CDF), 적용범위, 평균, 그리고 표준편차를 보여준다.

본 연구에서는 가뭄 사상의 지속기간과 심도의 확률분포형을 결정하는데 Easy fit (MathWave Technologies, 2004)을 이용하였다. Easy fit은 자료를 50가지가 넘는 확률분포형에 적용하여 적합도 검정(2.5.2절)을 해준다. 또한, 주어진 확률분포형에 대해서 모멘트법(method of moments), 최소자승법(least squares estimates), 최우도추정법(maximum likelihood estimation), 그리고 L-moment 총 4가지 매개변수추정법 중에서 가장 적절하다고 판단되는 한가지를 Easy fit이 자동으로 선택하여 매개변수를 추정해준다.

2.5.2 적합도 검정

적합도 검정(goodness of fit test)은 관측된 자료가 어떤 모형을 따르고 있는지 특히 어떤 이론적 분포를 따르고 있는지를 검정하는 방법을 뜻하며, 이에 대한 검정방법으로는 χ^2 (Chi-squared) test, Kolmogorov-Smirnov test, Anderson-Darling test 등이 있다. 본 연구에서는 χ^2 -test, Kolmogorov-Smirnov test, 그리고 Anderson-Darling test를 이용한다.

χ^2 -test는 자료 값의 크기에 따라 m 개의 계급구간으로 나누고 이론값과 자료 값의 도수를 비교하는 방법으로 χ^2 -test의 통계량은 식(2.17)과 같다.

$$q = \sum_{j=1}^m \frac{(n_j - e_j)^2}{e_j} \quad (2.17)$$

여기서, n_j 는 관측 자료의 j 번째 구간의 표본 관측도수, $e_j = np_j$ 는 확률분포의 j 번째 구간의 이론도수이며, m 은 계급구간의 수, n 은 관측 자료의 수이다. p_j 는 구간 내 특정 기각치를 만족하는 모의변수확률로 유의수준

Table 2.1 Properties of distributions used in this study

Distribution	PDF	CDF	Range	Mean	Standard deviation
Normal	$\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$	$\int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx$	$-\infty \leq x \leq \infty$	μ	σ
Log-normal $y = \ln x$	$\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_y^2}} e^{-\frac{(y-\mu_y)^2}{2\sigma_y^2}}$	$\int_{-\infty}^y \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_y^2}} e^{-\frac{(y-\mu_y)^2}{2\sigma_y^2}} dy$	$-\infty \leq y \leq \infty$ $0 \leq x \leq \infty$	μ_y	σ_y
Gamma	$\frac{x^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} e^{-\frac{x}{\beta}}$	$\frac{\gamma(\alpha, x/\beta)}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha}$	$0 \leq x \leq \infty$	$k\theta$	$\sqrt{k}\theta$
Exponential	$\lambda e^{-x\lambda}$	$1 - e^{-x\lambda}$	$0 \leq x \leq \infty$	$1/\lambda$	$1/\lambda$
Pareto	$\frac{\alpha\beta^\alpha}{x^{\alpha+1}}$ for $x \geq \beta$	$1 - \left(\frac{\beta}{x}\right)^\alpha$	$\beta \leq x \leq \infty$	$\frac{\alpha\beta}{\alpha-1}$ for $\alpha > 1$	$\sqrt{\frac{\beta^2\alpha}{(\alpha-1)^2(\alpha-2)}}$ for α
Weibull	$\frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha-1} e^{-(x-\gamma/\beta)^\alpha}$ $x \geq \gamma$ 0 $x < \gamma$	$1 - e^{-(x-\gamma/\beta)^\alpha}$	$\gamma \leq x \leq \infty$	$\beta\Gamma(1+1/\alpha)$	$\sqrt{\beta^2\Gamma(1+2/\alpha) - \mu^2}$
GEV	$\frac{1}{\sigma} t(x)^{k+1} e^{-t(x)}$, where $t(x) = \begin{cases} \left(1 + k\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right)^{-1/k} & \text{if } k \neq 0 \\ e^{-(x-\mu)/\sigma} & \text{if } k = 0 \end{cases}$	$e^{-t(x)}$	$\frac{\mu-\sigma}{k} \leq x \leq \infty$ when $k > 0$ $-\infty \leq x \leq \infty$ when $k = 0$ $-\infty \leq x \leq \frac{\mu-\sigma}{k}$ when $k < 0$	$\mu + \sigma \frac{\Gamma(1-k)-1}{k}$ if $k \neq 0, k < 1$ $\mu + \sigma\gamma$ if $k = 0$ ∞ if $k \geq 1$	$\sqrt{\sigma^2(g_2 - g_1^2)/k^2}$ if $k \neq 0, k < \frac{1}{2}$ $\frac{\sigma\pi}{\sqrt{6}}$ if $k = 0$ ∞ if $k \geq \frac{1}{2}$

에 대해 귀무가설이 $q \geq K$ 로 기각된다고 하면 $P[q \geq K; q \sim \chi^2(k-1)] = \alpha$ 로 정의되며, 여기서 $K = \chi^2(k-1)$ 이며, 각 계급구간을 나눈 후 결정된다. 일반적으로 계급구간은 등간격으로 하는데 관측 예상 수는 5 이상이어야 하며, Sturges (1926) 식에 의하여 계급수를 결정한다. 계산된 통계량 χ^2 가 식(2.18)의 관계를 가지면 가정된 분포는 유의수준 α 로 적합성이 인정되며, 그렇지 못하면 기각된다.

$$\chi^2 < \chi^2_{1-\alpha, \nu} \quad (2.18)$$

여기서, $\chi^2_{1-\alpha, \nu}$ 는 자유도가 $\nu (= m-1)$ 일 때 유의수준 α 로 가정한 분포의 적합성을 인정하는 χ^2 의 한계치이다.

Kolmogorov-Smirnov test는 표본자료의 누가분포함수와 가정된 이론확률분포의 누가분포함수를 비교하여 양자의 최대편차로 정의되며, 그 표본의 크기와 유의수준에 따라 결정되는 한계편차보다 적어야 적합성이 인정된다.

$$q = \max |\hat{F}_r(x) - F_0(x)| \quad (2.19)$$

여기서, $\hat{F}_r(x)$ 는 $F(x)$ 의 경험적 이론확률분포의 누가분포함수이며, $F_0(x)$ 는 표본자료의 누가분포함수로 식(2.20)과 같이 정의된다.

$$F_0(x) = \frac{m}{n} \quad (2.20)$$

여기서, n 은 순차적인 자료의 수, m 은 m 번째 값보다 작은 자료의 개수이다. q 는 $\hat{F}_r(x)$ 와 $F(x)$ 의 차의 최대값이며, n 의 크기에 따라 좌우되는 확률변수로서 주어진 유의수준 α 로 적합성을 검정하고자 할 때 q 를 식 (2.21)으로 정의되는 한계치 q^α 와 비교하게 된다.

$$P[q \leq q^\alpha] = 1 - \alpha \quad (2.21)$$

여기서, 유의수준은 $\alpha = P[q > c | H_0] \doteq 1 - e^{-2nc}$ 로 정의되는데 최대편차 q 가 한계치 q^α 보다 작으면 가정된 분포는 유의수준 α 로서 그 적합성이 인정된다.

Anderson-Darling Test는 관측값의 누가분포함수와 예측값의 누가분포함수를 비교하는 검정방법으로 Kolmogorov-Smirnov test 보다 분포의 꼬리에 더 많은 가중치를 둔다. 이 검정방법의 통계량 A^2 는 다음과 같이 정의된다.

$$A^2 = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2i-1) [\ln F(X_i) + \ln (1 - F(X_{n-i+1}))] \quad (2.22)$$

여기서 X_i 는 n 개의 순차적인 자료에서 i 번째 자료이다.

2.5.3 최우도 추정법

Fisher (1912)에 의해 소개되었으며, 통계학에서 가장 널리 사용되는 매개변수 추정법으로 maximum likelihood estimation (MLE)이라고 한다. MLE를 함수로 표현하면 추정하려는 확률변수가 θ 이고, X_1, X_2, \dots, X_n 이 확률밀도함수 $f(x|\theta)$ 로부터 나온 임의의 표본이라고 할 때, 임의표본의

관측치 x_1, x_2, \dots, x_n 의 결합확률밀도함수는 $f(x_1, x_2, \dots, x_n | \theta)$ 이다. $f(x_1, x_2, \dots, x_n | \theta)$ 는 x_1, x_2, \dots, x_n 이 관찰된 값이므로 확률변수 θ 의 함수이며 이를 우도함수(likelihood function) $L(\theta)$ 라고 한다. MLE는 이 우도함수 $L(\theta)$ 를 최대로 하는 θ 의 추정치를 구하는 방법이다.

2.5.4 L-moment

L-모멘트의 기본공식은 식(2.23)과 같다(Hosking, 1990).

$$\lambda_r = r^{-1} \sum_{k=0}^{r-1} (-1)^k \binom{r-2}{k} E(X_{r-k:r}) \quad r = 1, 2, 3, 4 \quad (2.23)$$

여기서, λ_r 은 순서통계량에 대한 각각의 기대치이며, $X_{i:n}$ 은 표본크기가 n 인 i 번째 순서통계량이다.

L-모멘트비(L-moment ratio; τ_r)인 L-변동계수(L-CV, τ_2), L-왜곡도(L-skewness, τ_3) 및 L-첨도(L-kurtosis, τ_4)는 식 (2.24, 2.25, 2.26)으로 표현된다.

$$\tau_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \quad (2.24)$$

$$\tau_3 = \frac{\lambda_3}{\lambda_2} \quad (2.25)$$

$$\tau_4 = \frac{\lambda_4}{\lambda_2} \quad (2.26)$$

2.6 저수량 빈도분석

하천에서의 저수량은 이용할 수 있는 자료의 형태와 최종 이용목적에 따라 다양한 방법에 의하여 분석될 수 있다. 이 중 가장 흔하게 이용하는 방법은 유황곡선(flow duration curve)을 이용하는 방법과 저수량을 위한 빈도분석(frequency analysis)이다. 저수량 빈도분석(low flow frequency analysis)의 결과는 저수용량의 설계, 물 공급 계획, 오염원의 배치 및 관개와 생태계의 보존을 위한 수량과 수질의 관리에 중요하게 사용된다. 본 연구에서 저수량 빈도분석은 copula를 이용한 하천 가뭄의 빈도분석 결과와 비교하기 위해 수행한다.

2.6.1 유황곡선

어떤 지점의 하천 유황을 분석한다는 것은 하천유량의 시간적 변동상태를 파악하는 것으로 그 목적에 따라 분석자료를 설정하게 된다. 일반적으로 유황이라고 하면 연중 유량의 시간적 변화상태를 의미하므로 일단위의 유량자료를 이용하여 분석하게 된다.

유황의 분석을 위하여 가장 흔히 사용하는 방법은 분석기간 전체에 대한 자료를 크기순으로 나열하고 유지비율에 따른 유량의 크기를 나타내는 유황곡선을 작성하는 것이다.

2.6.2 저수량 빈도곡선

저수량 빈도곡선(low flow frequency curve)을 그리는 방법은 다음과

같다. (1) 유량 자료의 계산하고자 하는 이동평균값(7일, 10일, 30일, 60일, 365일, 등)을 구한다. (2) 각각의 이동평균값을 작은값에서 큰값 순으로 순위를 정한다. (3) 순위에 대해 Weibull plotting position을 정한다. (4) 유량을 재현기간과 비초과확률에 맞게 도식한다. (5) 표시된 점들을 매끈하게 선으로 연결한다.

(3)에서 Weibull plotting position은 식(2.27)과 같다.

$$p_i = \frac{i}{n+1} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2.27)$$

$$T_L = \frac{1}{1-p_i} \quad (2.28)$$

여기서 p_i 는 i 번째 유량에 대한 비초과확률이며, n 은 자료의 수이다.

2.7 Copula

2.7.1 Copula의 기본 이론

Copula는 Sklar (1959)가 개발하였으며, 단변량 분포 함수와 다변량 분포 함수를 연결하는 함수(function)이다. 다변량 분포를 형성할 때 copula를 이용하면, 단변량 분포로부터 상관된 영향을 도출할 수 있는 이점이 있다. 단변량 분포가 주어졌을 때 다변량 분포로부터 상관된 확률변수를 고려하지 않고 단변량 분포를 분리하여 연구할 수 있고, 또 다변량 분포를 간편하게 형성할 수 있다. 본 연구에서는 가뭄의 지속기간(duration)과 심도(severity) 2 개의 변수에 대하여 연구를 하기 때문에

이변량 분포를 다룬다.

Sklar (1959)에 의하면, 두 개의 확률변수 X 와 Y 가 있고 $F_{X,Y}(x,y)$ 가 X, Y 에 대한 주변 누가분포함수 $F_X(x)$ 와 $F_Y(y)$ 를 갖는 결합 누가분포함수라고 하면, copula C 가 존재한다.

$$F_{X,Y}(x,y) = C(F_X(x), F_Y(y)) \quad (2.28)$$

반대로, 어느 주변 누가분포함수 $F_X(x), F_Y(y)$, 그리고 copula C 에 대해서 결합 누가분포함수 $F_{X,Y}(x,y)$ 는 주변 누가분포함수 $F_X(x)$ 와 $F_Y(y)$ 를 갖는 2차원 결합 누가분포함수로 정의된다. $F_X(x)$ 와 $F_Y(y)$ 가 연속이면 C 는 고유한 값을 갖는다(Schweizer와 Sklar, 1983).

주변 확률밀도함수 $f_X(x), f_Y(y)$ 가 연속이라고 가정하면, 결합 확률밀도함수는

$$f_{X,Y}(x,y) = c(F_X(x), F_Y(y))f_X(x)f_Y(y) \quad (2.29)$$

이고, c 는 확률변수 X, Y 에 대한 결합 확률밀도함수 $f_{X,Y}(x,y)$ 와 주변 확률밀도함수 $f_X(x), f_Y(y)$ 를 연결해주는 copula이며 다음과 같다.

$$c(u,v) = \frac{\partial^2 C(u,v)}{\partial u \partial v} \quad \text{where } u = F_X(x), v = F_Y(y) \quad (2.30)$$

2.7.2 Copula의 정의와 Clayton copula의 유도

확률변수 X 와 Y 에 대한 결합 누가분포함수 $F_{X,Y}(x,y)$ 와 주변 누가분

포함수 $F_X(x)$, $F_Y(y)$ 가 있을 때, X 와 Y 가 독립이면 $F_{X,Y}(x,y)$, $F_X(x)$, 그리고 $F_Y(y)$ 을 식(2.31)로 나타낼 수 있다.

$$F_{X,Y}(x,y) = F_X(x)F_Y(y) \quad (2.31)$$

식(2.31)을 통해 결합 누가분포함수 $F_{X,Y}(x,y)$ 가 주변 누가분포함수 $F_X(x)$ 와 $F_Y(y)$ 의 곱으로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 예를 들어, 확률변수 X 에 대해 초과확률과 비초과확률의 비를 식(2.32)처럼 나타낸다면, 유사한 방법으로 결합 누가분포함수 $F_{X,Y}(x,y)$ 의 초과확률과 비초과확률의 비를 $\frac{1-F_{X,Y}(x,y)}{F_{X,Y}(x,y)}$ 로 나타낼 수 있다.

$$\frac{P(X > x)}{P(X \leq x)} = \frac{1-F_X(x)}{F_X(x)} \quad (2.32)$$

확률변수 X , Y 가 모든 x , y 에 대해 식(2.33 ~ 2.35)로 표현할 수 있는 Gumbel의 이변량 분포를 만족한다고 가정하면, 식(2.36)의 계산을 통해 확인할 수 있듯이 결합 누가분포함수 $F_{X,Y}(x,y)$ 의 초과확률과 비초과확률의 비를 x 와 y 에 대한 간단 식으로 표현될 수 있다.

$$F_{X,Y}(x,y) = (1 + e^{-x} + e^{-y})^{-1} \quad (2.33)$$

$$F_X(x) = (1 + e^{-x})^{-1} \quad (2.34)$$

$$F_Y(y) = (1 + e^{-y})^{-1} \quad (2.35)$$

$$\begin{aligned}
\frac{1 - F_{X,Y}(x, y)}{F_{X,Y}(x, y)} &= \frac{1 - (1 + e^{-x} + e^{-y})^{-1}}{(1 + e^{-x} + e^{-y})^{-1}} \\
&= \frac{1}{(1 + e^{-x} + e^{-y})^{-1}} - 1 \\
&= 1 + e^{-x} + e^{-y} - 1 \\
&= e^{-x} + e^{-y}
\end{aligned} \tag{2.36}$$

식(2.34, 2.35)를 이용하여 확률변수 X, Y 의 주변 누가분포함수의 초과확률과 비초과확률의 비를 계산하면 식(2.37, 2.38)을 구할 수 있다.

$$\frac{1 - F_X(x)}{F_X(x)} = e^{-x} \tag{2.37}$$

$$\frac{1 - F_Y(y)}{F_Y(y)} = e^{-y} \tag{2.38}$$

식(2.36)의 우변과 식(2.37, 2.38)의 우변을 같게 만족시키기 위해 정리를 하면 식(2.39)를 구할 수 있다.

$$\frac{1 - F_{X,Y}(x, y)}{F_{X,Y}(x, y)} = \frac{1 - F_X(x)}{F_X(x)} + \frac{1 - F_Y(y)}{F_Y(y)} \tag{2.39}$$

또한, 확률변수 X, Y 가 서로 독립이 아니라도 주변 누가분포함수 $F_X(x), F_Y(y)$, 그리고 결합 누가분포함수 $F_{X,Y}(x, y)$ 에 대해 식(2.42)같이 표현할 수 있다.

$$F_X(x) = \left(1 + \frac{1 - F_X(x)}{F_X(x)}\right)^{-1} \quad (2.40)$$

$$F_Y(y) = \left(1 + \frac{1 - F_Y(y)}{F_Y(y)}\right)^{-1} \quad (2.41)$$

$$F_{X,Y}(x, y) = \left(1 + \frac{1 - F_{X,Y}(x, y)}{F_{X,Y}(x, y)}\right)^{-1} \quad (2.42)$$

식(2.31)과 식(2.40 ~ 2.42)를 이용하여 식(2.43)을 얻을 수 있으며, Ali 등 (1978)은 식(2.39)와 식(2.43)이 비슷한 것을 보고 특정 매개변수 θ 에 대해 두 개의 식 중에서 어떤 식을 사용할 것인지에 대한 연구를 하였다.

$$\frac{1 - F_{X,Y}(x, y)}{F_{X,Y}(x, y)} = \frac{1 - F_X(x)}{F_X(x)} + \frac{1 - F_Y(y)}{F_Y(y)} + \frac{1 - F_X(x)}{F_X(x)} \frac{1 - F_Y(y)}{F_Y(y)} \quad (2.43)$$

식(2.44)을 보면, θ 가 1일 경우 식(2.44)는 식(2.39)로 표현되고, θ 가 0일 경우 식(2.44)는 식(2.43)으로 표현된다.

$$\frac{1 - F_{X,Y}(x, y)}{F_{X,Y}(x, y)} = \frac{1 - F_X(x)}{F_X(x)} + \frac{1 - F_Y(y)}{F_Y(y)} + (1 - \theta) \frac{1 - F_X(x)}{F_X(x)} \frac{1 - F_Y(y)}{F_Y(y)} \quad (2.44)$$

확률변수 X, Y 의 누가분포함수를 식(2.45, 2.46)과 같이 변환하고, C 를 확률변수 X, Y 에 대한 누가분포함수의 copula라고 하면, Sklar의 이론에 따라 식(2.44)를 식(2.47)로 바꿔서 나타낼 수 있다.

$$u = F_X(x) \quad (2.45)$$

$$v = F_Y(y) \quad (2.46)$$

$$\frac{1 - C(u, v)}{C(u, v)} = \frac{1 - u}{u} + \frac{1 - v}{v} + (1 - \theta) \frac{1 - u}{u} \frac{1 - v}{v} \quad (2.47)$$

식(2.47)을 $C(u, v)$ 에 대해 정리를 하면 식(2.48)의 계산과정을 통해 copula의 종류 중 하나인 Ali-Mikhail-Haq 식(2.49)를 구할 수 있다.

$$1 - C(u, v) = C(u, v) \left(\frac{1 - u}{u} + \frac{1 - v}{v} + (1 - \theta) \frac{1 - u}{u} \frac{1 - v}{v} \right) \quad (2.48)$$

$$C(u, v) \left(\frac{1 - u}{u} + \frac{1 - v}{v} + (1 - \theta) \frac{1 - u}{u} \frac{1 - v}{v} + 1 \right) = 1$$

$$C(u, v) \left(\frac{v(1 - u) + u(1 - v)}{uv} + \frac{(1 - \theta)(1 - u)(1 - v)}{uv} + \frac{uv}{uv} \right) = 1$$

$$C(u, v) \left(\frac{v - uv + u - uv + uv + (1 - \theta)(1 - u)(1 - v)}{uv} \right) = 1$$

$$C(u, v) \left(\frac{v - uv + u + (1 - u)(1 - v) - \theta(1 - u)(1 - v)}{uv} \right) = 1$$

$$C(u, v) \left(\frac{1 - \theta(1 - u)(1 - v)}{uv} \right) = 1$$

$$C(u, v) = \frac{uv}{1 - \theta(1 - u)(1 - v)}, \quad -1 \leq \theta \leq 1 \quad (2.49)$$

식(2.31)부터 식(2.44)까지의 계산과정을 통해 확률변수 X, Y 에 대한 결합 누가분포함수 $F_{X,Y}(x, y)$ 와 주변 누가분포함수 $F_X(x), F_Y(y)$ 가 식(2.44)의 관계를 만족하는 것을 확인할 수 있다. 간단한 계산과정(식2.50,

2.51)을 통해 식(2.44)를 식(2.52)로 표현할 수 있다.

$$(1-\theta)\frac{1-F_{X,Y}(x,y)}{F_{X,Y}(x,y)} = (1-\theta)\frac{1-F_X(x)}{F_X(x)} + (1-\theta)\frac{1-F_Y(y)}{F_Y(y)} \\ + (1-\theta)^2\frac{1-F_X(x)}{F_X(x)}\frac{1-F_Y(y)}{F_Y(y)} \quad (2.50)$$

$$1 + (1-\theta)\frac{1-F_{X,Y}(x,y)}{F_{X,Y}(x,y)} = 1 + (1-\theta)\frac{1-F_X(x)}{F_X(x)} + (1-\theta)\frac{1-F_Y(y)}{F_Y(y)} \\ + (1-\theta)^2\frac{1-F_X(x)}{F_X(x)}\frac{1-F_Y(y)}{F_Y(y)} \quad (2.51)$$

$$1 + (1-\theta)\frac{1-F_{X,Y}(x,y)}{F_{X,Y}(x,y)} = \left(1 + (1-\theta)\frac{1-F_X(x)}{F_X(x)}\right)\left(1 + (1-\theta)\frac{1-F_Y(y)}{F_Y(y)}\right) \quad (2.52)$$

식(2.52)는 다시 식(2.53)으로 표현할 수 있으며, 식(2.54)를 통해 결합 누가분포함수 $F_{X,Y}(x,y)$ 에 대한 copula 발생기 함수를 주변 누가분포함수 $F_X(x)$ 와 $F_Y(y)$ 에 대한 copula 발생기 함수의 합으로 표현할 수 있다(식2.55).

$$\lambda(F_{X,Y}(x,y)) = \lambda(F_X(x))\lambda(F_Y(y)) \quad \text{where } \lambda(t) = 1 + (1-\theta)\frac{1-t}{t} \quad (2.53)$$

$$\phi(t) = -\ln\lambda(t) \quad (2.54)$$

$$\phi(F_{X,Y}(x,y)) = \phi(F_X(x)) + \phi(F_Y(y)) \quad (2.55)$$

여기서, $\phi(t)$ 는 copula 발생기이며, 식(2.55)를 다시 식(2.56)으로 쓸 수 있다.

$$\phi(C(u, v)) = \phi(u) + \phi(v) \quad (2.56)$$

식(2.56)을 이용하여, 좌변을 copula에 대한 식으로 만들면 식(2.57)을 구할 수 있다.

$$C(u, v) = \phi^{-1}(\phi(u) + \phi(v)) \quad (2.57)$$

여기서, $\phi^{-1}(t)$ 는 copula 발생기인 $\phi(t)$ 의 역함수이다.

본 연구에서 선정된 주변 누가분포함수와 결합 누가분포함수를 연결하는 Clayton copula는 copula 발생기(식2.58)과 그 역함수(식2.59)를 식(2.57)에 대입하여 구할 수 있다(식2.60).

$$\phi_{Clayton}(t) = t^{-\theta} - 1 \quad (2.58)$$

$$\phi_{Clayton}^{-1}(t) = (1 + t)^{-\frac{1}{\theta}} \quad (2.59)$$

$$\begin{aligned} C(u, v) &= (1 + (u^{-\theta} - 1) + (v^{-\theta} - 1))^{-\frac{1}{\theta}} \\ &= (1 + u^{-\theta} + v^{-\theta} - 2)^{-\frac{1}{\theta}} \\ &= (u^{-\theta} + v^{-\theta} - 1)^{-\frac{1}{\theta}} \end{aligned} \quad (2.60)$$

2.7.3 Copula의 종류와 선정

식(2.61 ~ 2.65)은 본 연구에서 다룬 copula의 (a)누가분포함수와 (b)확률밀도함수에 관한 식이다.

- Clayton

$$C(u, v) = (u^{-\theta_c} + v^{-\theta_c} - 1)^{-\frac{1}{\theta_c}}, \quad \theta_c \geq 0 \quad (2.61a)$$

$$c(u, v) = (\theta_c + 1)(u^{-\theta_c} + v^{-\theta_c} - 1)^{-\frac{1}{\theta_c} - 2} (uv)^{-\theta_c - 1} \quad (2.61b)$$

- Frank

$$C(u, v) = -\frac{1}{\theta_c} \ln \left[1 + \frac{(e^{-\theta_c u} - 1)(e^{-\theta_c v} - 1)}{e^{-\theta_c} - 1} \right], \quad \theta_c \neq 0 \quad (2.62a)$$

$$c(u, v) = -1 \frac{\theta_c e^{-\theta_c(u+v)} (e^{-\theta_c} - 1)}{[e^{-\theta_c(u+v)} - e^{-\theta_c u} - e^{-\theta_c v} + e^{-\theta_c}]^2} \quad (2.62b)$$

- Galambos

$$C(u, v) = uv \exp[(-\ln u)^{-\theta_c} + (-\ln v)^{-\theta_c}]^{-\frac{1}{\theta_c}}, \quad \theta_c \geq 0 \quad (2.63a)$$

$$\begin{aligned} c(u, v) = & \frac{C(u, v)}{uv} [1 - [(-\ln u)^{-\theta_c} + (-\ln v)^{-\theta_c}]^{-\frac{1}{\theta_c} - 1} [(-\ln u)^{-\theta_c - 1} + (-\ln v)^{-\theta_c - 1}] \\ & + [(-\ln u)^{-\theta_c} + (-\ln v)^{-\theta_c}]^{-\frac{1}{\theta_c} - 2} [(-\ln u)(-\ln v)]^{-\theta_c - 1} \\ & [1 + \theta_c + [(-\ln u)^{-\theta_c} + (-\ln v)^{-\theta_c}]^{-\frac{1}{\theta_c}}] \end{aligned} \quad (2.63b)$$

- Gumbel-Hougaard

$$C(u, v) = \exp[-[(-\ln u)^{\theta_c} + (-\ln v)^{\theta_c}]^{\frac{1}{\theta_c}}], \quad \theta_c \geq 1 \quad (2.64a)$$

$$c(u, v) = C(u, v) \frac{[(-\ln u)(-\ln v)]^{\theta_c - 1}}{uv} [(-\ln u)^{\theta_c} + (-\ln v)^{\theta_c}]^{\frac{2}{\theta_c} - 2} [(\theta_c - 1)[(-\ln u)^{\theta_c} + (-\ln v)^{\theta_c}]^{-\frac{1}{\theta_c} + 1}] \quad (2.64b)$$

- Plackett

$$C(u, v) = \frac{1}{2} \frac{1}{\theta_c - 1} [1 + (\theta_c - 1)(u + v) - \{(1 + (\theta_c - 1)(u + v))^2 - 4\theta_c(\theta_c - 1)uv\}^{\frac{1}{2}}], \quad \theta_c \geq 0 \quad (2.65a)$$

$$c(u, v) = [(1 + (\theta_c - 1)(u + v))^2 - 4\theta_c(\theta_c - 1)uv]^{-\frac{3}{2}} \theta_c [1 + (\theta_c - 1)(u + v - 2uv)] \quad (2.65b)$$

여기서, u, v 는 0 ~ 1의 범위를 갖는 값이고, θ_c 는 copula 매개변수이다.

Copula의 선정은 Akaike's information criterion (AIC)을 이용한다. AIC는 통계학적으로 적합도 검정을 하는 방법으로 Akaike (1974)가 개발하였으며, 수식은 식(2.66)과 같다.

$$AIC(m) = n \log(MSE) + 2m \quad (2.66)$$

여기서 n 은 관측값의 수이고 m 은 적용된 copula의 매개변수 수이다. MSE

는 적용한 copula의 mean square error로 수식은 식(2.67)로 나타낼 수 있다.

$$MSE = \frac{1}{n-m} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 \quad (2.67)$$

여기서 O_i 와 P_i 는 각각 매개변수의 관측값과 추정값이다.

Berg (2009)은 copula를 이용한 연구에서 선정된 copula가 적합한지에 대해 의문을 제기하였고, 선정방법에 대해 연구를 하였다. AIC를 이용하는 방법은 귀무가설의 기각을 통해서 적합도 검정을 하는 goodness of fit 방법과 같은 정보를 제공하지 않는다. Genest와 Rivest (1993)은 Archimedean copula에 대해 경험적인 방법으로 copula를 선정하는 방법을 제안했다.

Zhang과 Singh (2007a, b, and c), Mirakbari 등 (2010), Chen 등 (2011), Li 등 (2011), Zhang 등 (2011)은 AIC와 BIC (Bayesian Information Criterion), PIT (Probability Integral Transform), MLE (Maximum Likelihood Estimation) 등을 이용하여 다양한 방법으로 copula를 선정하였다. 그러나 이들의 연구에서 선정한 copula를 보면, MLE 등의 적합도 검정방법의 결과값에 관계없이 AIC 값이 가장 작은 copula가 가장 적절하다고 선정되는 것을 확인 할 수 있는데, 이를 근거로 본 연구에서는 AIC를 이용하여 copula를 선정하였다.

2.7.4 Copula 매개변수 추정

Copula의 매개변수를 추정하기 위해서는 method of Inference Function for Margins (IFM method)를 이용하며, 방법은 다음과 같다 (Joe, 1997). 우선, L-moment를 이용하여 일변량 주변분포들의 매개변수

를 먼저 구해야한다. 예를 들어, 가뭄의 지속기간과 심도가 각각 Weibull 분포와 GEV 분포의 형태를 갖는다고 하고 각각의 매개변수를 산정한다. n 개의 (d_i, s_i) 가 주어지면 로그-우도 함수(log-likelihood function)를 통해 가뭄의 지속기간과 심도에 대해 매개변수를 추정한다(식 2.68, 2.69).

$$\ln L_D(d; \alpha, \beta, \gamma) \quad (2.68)$$

$$\ln L_S(s; k, \sigma, \mu) \quad (2.69)$$

$\hat{\alpha}$, $\hat{\beta}$, 그리고 $\hat{\gamma}$ 는 가뭄의 지속기간에 해당하는 Weibull 분포로부터 추정된 매개변수이고, $\hat{\kappa}$, $\hat{\sigma}$, 그리고 $\hat{\mu}$ 는 가뭄의 심도에 해당하는 GEV 분포로부터 추정된 매개변수이다.

가뭄 지속기간과 심도의 이변량 결합분포의 로그-우도함수는 식 (2.29)와 같은 형태로 정리할 수 있다(식2.70).

$$\begin{aligned} \ln L_{D,S}(d, s; \alpha, \beta, \gamma, \kappa, \sigma, \mu, \theta_c) &= \ln L_C(F_D(d), F_S(s); \theta_c) \\ &+ \ln L_D(d; \alpha, \beta, \gamma) + \ln L_S(s; \kappa, \sigma, \mu) \end{aligned} \quad (2.70)$$

$L_C(F_D(d), F_S(s))$ 는 가뭄의 지속기간과 심도의 주변 누가분포함수에 대한 copula의 로그-우도함수이다. 추정된 매개변수 $\hat{\kappa}$, $\hat{\sigma}$, $\hat{\mu}$, $\hat{\alpha}$, $\hat{\beta}$, 그리고 $\hat{\gamma}$ 를 로그-우도함수 $L_{D,S}(d, s)$, $L_C(F_D(d), F_S(s))$, $L_D(d)$, 그리고 $L_S(s)$ 에 대입하여 식(2.70)을 만족시키는 copula의 매개변수 $\hat{\theta}_c$ 를 구한다.

매개변수 추정을 통해 구한 변수들을 선정된 copula에 대입하면 가뭄의 지속기간과 심도에 대한 결합 누가분포함수를 구할 수 있게 된다.

$$F_{D,S}(d, s) = C(F_D(d), F_S(s)) \quad (2.71)$$

여기서, $F_D(d)$ 와 $F_S(s)$ 는 각각 가뭄 지속기간과 심도의 누가분포함수이다.

$$F_D(d) = 1 - e^{-(d - \gamma/\beta)^\alpha} \quad (2.72)$$

$$F_S(s) = e^{-\left\{1 + \kappa \left(\frac{s - \mu}{\sigma}\right)\right\}^{-1/\kappa}} \quad (2.73)$$

2.8 가뭄 재현기간

2.8.1 재현기간

어느 관측된 사건의 재현기간은 그것의 초과확률($P(X > x)$)의 역수에 해당한다.

$$T = \frac{1}{P(X > x)} = \frac{1}{1 - P(X \leq x)} \quad (2.74)$$

여기서, x 는 사건을 표시하는 확률변수 X 의 값이며, X 는 확률변수이다. Gonzalez와 Valdes (2003)는 가뭄의 재현 간격과 Run이론을 통하여 가뭄의 발생주기 L 을 설명하였다.

$N_{D,S}$ 를 다음에 발생할 가뭄사상의 지속기간 D 과 심도 S 가 각각 d, s 보다 크거나 같을 때까지의 가뭄사상의 수라고 하면, 다음번에 발생할 가뭄사상의 지속기간과 심도가 각각 d, s 보다 크거나 같은 가뭄이 발생할 때까지의 가뭄 발생주기 $T_{D,S}$ 는 식(2.75)로 표현할 수 있다.

$$T_{D,s} = \sum_{i=1}^{N_{D,s}} L_i \quad (i = 1, 2, \dots, N_{D,s}) \quad (2.75)$$

여기서, L_i 는 지속기간, 심도의 크기에 관계없이 발생하는 모든 가뭄사상의 발생주기이다.

Shiau와 Sen (2001)과 Gonzalez와 Valdes (2003)에 의하면 $T_{D,s}$ 의 기댓값이 가뭄의 재현기간을 의미하며, 식(2.76)과 같이 표현할 수 있다.

$$E(T_{D,s}) = E(N_{D,s})E(L) \quad (2.76)$$

각각의 가뭄이 독립적이라는 가정아래 다음 가뭄이 발생하는 횟수($N_{D,s}$)는 확률변수로 기댓값은 식(2.77)과 같은 값을 갖는다.

$$E(N_{D,s}) = \frac{1}{P(D > d, S > s)} = \frac{1}{1 - F_{D,s}(d, s)} \quad (2.77)$$

$F_{D,s}(d, s)$ 가 가뭄의 지속기간과 심도가 각각 d, s 보다 큰 가뭄사상에 대한 누가분포함수면, 발생한 가뭄사상의 가뭄의 지속기간과 심도가 각각 d, s 보다 클 확률은 $1 - F_{D,s}(d, s)$ 이다. 그러므로 가뭄의 재현빈도를 의미하는 $T_{D,s}$ 의 기대값은 식(2.76)과 식(2.77)을 이용하여 다시 식(2.78)로 나타낼 수 있다.

$$E(T_{D,s}) = \frac{E(L)}{1 - F_{D,s}(d, s)} \quad (2.78)$$

식(2.78)을 통해 가뭄의 재현기간은 가뭄의 평균 발생주기와 가뭄의 지속기간과 심도의 확률분포형에 영향을 받는 것을 알 수 있다.

Shiau와 Sen (2001) 그리고 Gonzalez와 Valdes (2003)는 각각 가뭄의 지속기간과 심도의 누가분포함수를 이용하여 가뭄의 재현기간을 구하였는데, 가뭄의 지속기간에 대해서 N_D 를 다음에 발생할 가뭄사상의 지속기간 D 가 d 보다 크거나 같을 때까지의 가뭄사상의 수라고 하면, 다음번에 발생할 가뭄사상의 지속기간 D 가 d 보다 크거나 같은 가뭄이 발생할 때까지의 가뭄 재현기간 T_D 는 $T_D = \sum_{i=1}^{N_D} L_i$ ($i = 1, 2, \dots, N_D$)로 표현할 수 있다. 반대로, 심도에 대해서 N_S 를 다음에 발생할 가뭄사상의 심도 S 가 s 보다 크거나 같을 때까지의 가뭄사상의 수라고 하면, 다음번에 발생할 가뭄사상의 심도 S 가 s 보다 크거나 같은 가뭄이 발생할 때까지의 가뭄 재현기간 T_S 는 $T_S = \sum_{i=1}^{N_S} L_i$ ($i = 1, 2, \dots, N_S$)로 표현할 수 있다. 이는 식 (2.75 ~ 2.78)의 과정과 동일하며, 가뭄의 지속기간 D 와 심도 S 각각에 대한 재현기간은 식(2.79)를 이용하여 구할 수 있다.

$$T_D = \frac{E(L)}{1 - F_D(d)} \quad (2.79a)$$

$$T_S = \frac{E(L)}{1 - F_S(s)} \quad (2.79b)$$

여기서, L 은 가뭄사상의 시작과 다음 가뭄사상의 시작 사이의 시간인 가뭄이 다시 발생하는 기간이며, $E(L)$ 은 가뭄사상이 다시 발생하는 평균 기간, $F_D(d)$, $F_S(s)$ 는 각각 가뭄의 지속기간 D 와 심도 S 의 누가분포함수이다.

2.8.2 결합 확률(joint probability)을 이용한 가뭄의 재현기간

가뭄의 지속기간과 심도에 대한 누가분포함수와 copula를 이용(식 2.71)하여 지속기간과 심도를 동시에 고려하여 표현한 것을 식(2.80, 2.81)에서 볼 수 있다.

$$\begin{aligned} P(D > d \text{ and } S > s) &= 1 - F_D(d) - F_S(s) + F_{D,S}(d, s) \\ &= 1 - F_D(d) - F_S(s) + C(F_D(d), F_S(s)) \end{aligned} \quad (2.80)$$

$$\begin{aligned} P(D > d \text{ or } S > s) &= 1 - F_{D,S}(d, s) \\ &= 1 - C(F_D(d), F_S(s)) \end{aligned} \quad (2.81)$$

가뭄의 지속기간과 심도에 대해서 $N_{D \text{ and } S}$ 를 다음에 발생할 가뭄사상의 지속기간 D 가 d 보다 크거나 같을 때 그리고 심도 S 가 s 보다 크거나 같을 때까지의 가뭄사상의 수라고 하면, 다음번에 발생할 가뭄사상의 지속기간 D 와 심도 S 가 각각 d 와 s 보다 크거나 같은 가뭄이 발생할 때까지의 가뭄 재현기간 $T_{D \text{ and } S} (= T_{DS})$ 는 $T_{DS} = \sum_{i=1}^{N_{D \text{ and } S}} L_i \ (i = 1, 2, \dots, N_{D \text{ and } S})$ 로 표현할 수 있다. 또, 가뭄의 지속기간과 심도에 대해서 $N_{D \text{ or } S}$ 를 다음에 발생할 가뭄사상의 지속기간 D 가 d 보다 크거나 같을 때 또는 심도 S 가 s 보다 크거나 같을 때까지의 가뭄사상의 수라고 하면, 다음번에 발생할 가뭄사상의 지속기간 D 와 심도 S 가 각각 d 와 s 보다 크거나 같은

가뭄이 발생할 때까지의 가뭄 재현기간 $T_{D \text{ or } S} (= T'_{DS})$ 는 $T'_{DS} = \sum_{i=1}^{N_{D \text{ or } S}} L_i$

($i = 1, 2, \dots, N_{D \text{ or } S}$)로 표현할 수 있다.

가뭄의 지속기간과 심도를 동시에 고려하면 식(2.79)와 식(2.80, 2.81)에 근거하여 가뭄의 재현빈도는 식(2.82)와 같이 가뭄의 지속기간이 특정 기간보다 크고 가뭄의 심도가 특정 값보다 큰 경우와 식(2.83)과 같이 가뭄의 지속기간이 특정 기간보다 크거나 가뭄의 심도가 특정 값보다 큰 경우로 나타낼 수 있다.

$$T_{DS} = \frac{E(L)}{P(D > d \text{ and } S > s)} \quad (2.82)$$

$$= \frac{E(L)}{1 - F_D(d) - F_S(s) + F_{D, S}(d, s)}$$

$$= \frac{E(L)}{1 - F_D(d) - F_S(s) + C(F_D(d), F_S(s))}$$

$$T'_{DS} = \frac{E(L)}{P(D > d \text{ or } S > s)} \quad (2.83)$$

$$= \frac{E(L)}{1 - F_{D, S}(d, s)}$$

$$= \frac{E(L)}{1 - C(F_D(d), F_S(s))}$$

여기서, T_{DS} 는 $D > d$ 그리고 $S > s$ 일 때의 가뭄 재현빈도이며, T'_{DS} 는 $D > d$ 이거나 $S > s$ 일 때의 가뭄 재현빈도이다.

Copula를 이용하여 이변량 결합 확률분포를 형성하면, 조건부 결합 확률분포를 유도하여 계산할 수 있다. 조건부 결합 확률분포는 식(2.84, 2.85)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
P(D \leq d | S > s') &= \frac{P(D \leq d \text{ or } S > s')}{P(S > s')} \\
&= \frac{F_D(d) - F_{D,S}(d, s')}{1 - F_S(s')} \\
&= \frac{F_D(d) - C(F_D(d), F_S(s'))}{1 - F_S(s')}
\end{aligned} \tag{2.84}$$

$$\begin{aligned}
P(S \leq s | D > d') &= \frac{P(D > d' \text{ or } S \leq s)}{P(D > d')} \\
&= \frac{F_S(s) - F_{D,S}(d', s)}{1 - F_D(d')} \\
&= \frac{F_S(s) - C(F_D(d'), F_S(s))}{1 - F_D(d')}
\end{aligned} \tag{2.85}$$

가뭄의 지속기간과 가뭄의 심도에 대한 조건부 재현기간을 식(2.86)과 식(2.87)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned}
T_{D|S>s} &= \frac{E(L)}{1 - P(D \leq d | S > s')} \\
&= \frac{E(L)}{1 - \frac{F_D(d) - C(F_D(d), F_S(s'))}{1 - F_S(s')}} \\
&= \frac{E(L) \times \{1 - F_S(s')\}}{1 - F_S(s') - F_D(d) + C(F_D(d), F_S(s'))}
\end{aligned} \tag{2.86}$$

$$\begin{aligned}
T_{S|D>d} &= \frac{E(L)}{1 - P(S \leq s | D > d')} \\
&= \frac{E(L)}{1 - \frac{F_S(s) - C(F_D(d'), F_S(s))}{1 - F_D(d')}} \\
&= \frac{E(L) \times \{1 - F_D(d')\}}{1 - F_S(s) - F_D(d') + C(F_D(d'), F_S(s))}
\end{aligned} \tag{2.87}$$

여기서 $T_{D|S>s}$ 는 가뭄 심도가 s 보다 큰 경우의 가뭄 지속기간에 대한 조건부 재현기간이고, $T_{S|D>d}$ 는 가뭄 지속기간이 d 보다 큰 경우의 가뭄 심도에 대한 조건부 재현기간이다. 지속기간을 매개변수로 고려하는 저수량 빈도분석으로 계산한 재현기간은 $T_{S|D>d}$ 와 비교하는 것이 적절할 것이다.

2.9 SDF (Severity-Duration-Frequency) 곡선

SDF 곡선은 특정 지역에 심한 가뭄이 발생할 가능성 그리고 특정 지속기간에 대한 심도의 가뭄이 미래에 언제 다시 발생하는지를 알 수 있게 해주는 곡선으로, 가뭄의 심도(severity)와 지속기간(duration) 그리고 재현기간으로 나타낼 수 있는 빈도(frequency)로 이루어져 있다. 일반적으로 x 축에 지속기간, y 축에 심도가 있고 재현기간의 크기에 따라 곡선을 그리며, 가뭄의 영향을 많이 받는 지역에서 수자원 계획 및 관리를 하는데 있어서 정보를 제공한다.

본 연구에서는 식(2.84, 2.85)의 조건부 결합확률을 이용하며, 주어진 지속기간 d 에 대한 조건부 재현기간 $T_{S|D}(s|d)$ 의 심도 s 는 식(2.88)과 같

이 나타낼 수 있다.

$$T_{S|D}(s|d) = \frac{E(L)}{1 - F_{S|D}(s|d)} \quad (2.88)$$

Joe (1997)은 확률변수 X 와 Y 의 누가분포함수에 대해 조건부 Clayton copula를 제안하였는데, 확률변수 X 와 Y 를 가뭄의 지속기간 D 와 심도 S 의 누가분포함수 형태로 고쳐쓰면 식(2.89)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} F_{S|D}(s|d) &= C_{F_S(s)|F_D(d)}(F_S(s)|F_D(d)) \\ &= \left[1 + F_D(d)^{\theta_c} (F_S(s)^{-\theta_c} - 1) \right]^{-\frac{1}{\theta_c} - 1} \end{aligned} \quad (2.89)$$

식(2.88)과 식(2.89)의 관계를 이용하여 SDF 곡선의 공식(식2.90)을 구할 수 있다.

$$T_{S|D}(s|d) = \frac{E(L)}{1 - \left[1 + F_D(d)^{\theta_c} (F_S(s)^{-\theta_c} - 1) \right]^{-\frac{1}{\theta_c} - 1}} \quad (2.90)$$

3. 적용 대상 및 연구 방법

3.1 적용 대상

본 연구의 적용대상은 주천, 정선2, 평창, 그리고 영월1 지점으로, 남한강 상류 유역을 4개의 소유역으로 볼 때 주천, 정선2, 평창, 그리고 영월1 지점을 각 소유역의 대표 관측지점으로 선택하였다. 각각의 유량관측소는 강원도 영월군 주천면 주천리, 정선군 정선읍 봉양리, 평창군 평창읍 중리, 그리고 영월군 영월읍 덕포리에 위치하며, 주천강과 평창강 그리고 남한강 상류의 유량관측소로 있으며, 국토해양부에서 관리하고 있다. Table 3.1은 각각의 유량 관측지점의 상세정보를 보여주며, Figure 3.1은 연구 대상인 주천, 정선2, 평창, 그리고 영월1 지점이 포함되어 있는 유역도를 보여주고 있다. 주천 관측소는 1963년, 정선2 관측소는 1962년, 평창 관측소는 1958년, 그리고 영월1 관측소는 1975년부터 월유량 자료를 보유하고 있으며, 자료를 보유하고 있는 기간부터 2012년까지 각각 49년, 50년, 54년, 그리고 37년치의 자료를 본 연구에 사용하였다.

남한강 상류 유역의 가뭄 피해 현황에 대해 조사해본 결과, 최근 장기간에 걸쳐 비가 오지 않아 가뭄을 겪고 있으며, 그 외에도 여러차례 가뭄 피해를 입은 것으로 확인 되었다. 1990년대 중반에는 전국적인 가뭄 피해가 있었다. 특히 남한강 상류 유역의 가뭄 피해 사례로는 2000년대 초반에 영월과 정선 지역을 대상으로 농작물 피해와 급수가 제한되는 피해가 있었으며, 2008년에는 태백 지역에 심한 가뭄피해가 있었다.

Table 3.1 Details of measurement sites and length of streamflow data

Site	Location	Latitude	Longitude	Watershed area (km ²)	Length of data (years)
Jucheon	Jucheon-ri, Jucheon-myeon, Yeongwol-gun, Gangwon-do, Korea	37° 16' 05"	128° 15' 56"	533.23	1963~2012 (49)
Jeongseon 2	Bongyang-ri, Jeongseon-eup, Jeongseon-gun, Gangwon-do, Korea	37° 22' 42"	128° 39' 26"	1688.41	1962~2012 (50)
Pyeongchang	Jung-ri, Pyeongchang-eup, Pyeongchang-gun, Gangwon-do, Korea	37° 22' 04"	128° 24' 22"	695.67	1958~2012 (54)
Yeongwol 1	Deokpo-ri, Yeongwol-eup, Yeongwol-gun, Gangwon-do, Korea	37° 10' 55"	128° 20' 32"	2440.36	1975~2012 (37)



Figure 3.1 Study area

3.2 연구 방법

Figure 3.2는 본 연구의 흐름도를 보여준다.

3.2.1 가뭄의 지속기간과 심도의 계산

본 연구는 기상학적 가뭄, 수문학적 가뭄, 그리고 농학적 가뭄 중에서 수문학적 가뭄에 대해 빈도분석을 수행하기 위해 유량 자료를 이용한다. 월단위 유량 자료에 linear-regression test, Hotelling-Pabst test, 그리고 Mann-Kendall test를 이용하여 경향성을 확인하고, 그 후에 월별 유량 자료를 표준화시켜서 계절성을 고려해준다.

표준화된 월별 유량자료를 이용하여 유황곡선을 그리고, 본 연구에서 절단수준으로 선정한 유황곡선의 75%에 해당하는 유량 값을 계산한다. 절단수준과 표준화된 유량을 이용하여 유량 자료가 절단수준을 내려가는 부분을 가뭄의 시작, 올라가는 부분을 가뭄의 끝으로 정의하여 각각의 가뭄 사상을 구한다.

절단수준은 표준화된 유량의 월별 유황곡선의 75%로 선정하여 계산하였다. 국내에서 갈수량 빈도분석을 할 때 자주 이용하는 유량(Q_{355})을 절단수준으로 선정하면 정의되는 가뭄사상의 경우가 적어 빈도분석을 수행하는데 자료의 양이 부족할 것이라 사료되어 본 연구는, Kjeldsen 등 (2000)이 제안한 월별 유황곡선의 75%(Q_{75})를 이용한다. Lee (2000)는 Q_{75} 를 저수량(low flow)로 정의하였으며, Q_{75} 는 우리나라의 저수량(Q_{275})에 해당된다.

절단수준법을 통해 Figure 2.3에서 확인할 수 있듯이 가뭄의 지속기간(drought duration, d_i), 가뭄의 심도(drought severity, s_i), 가뭄 사이의 기간

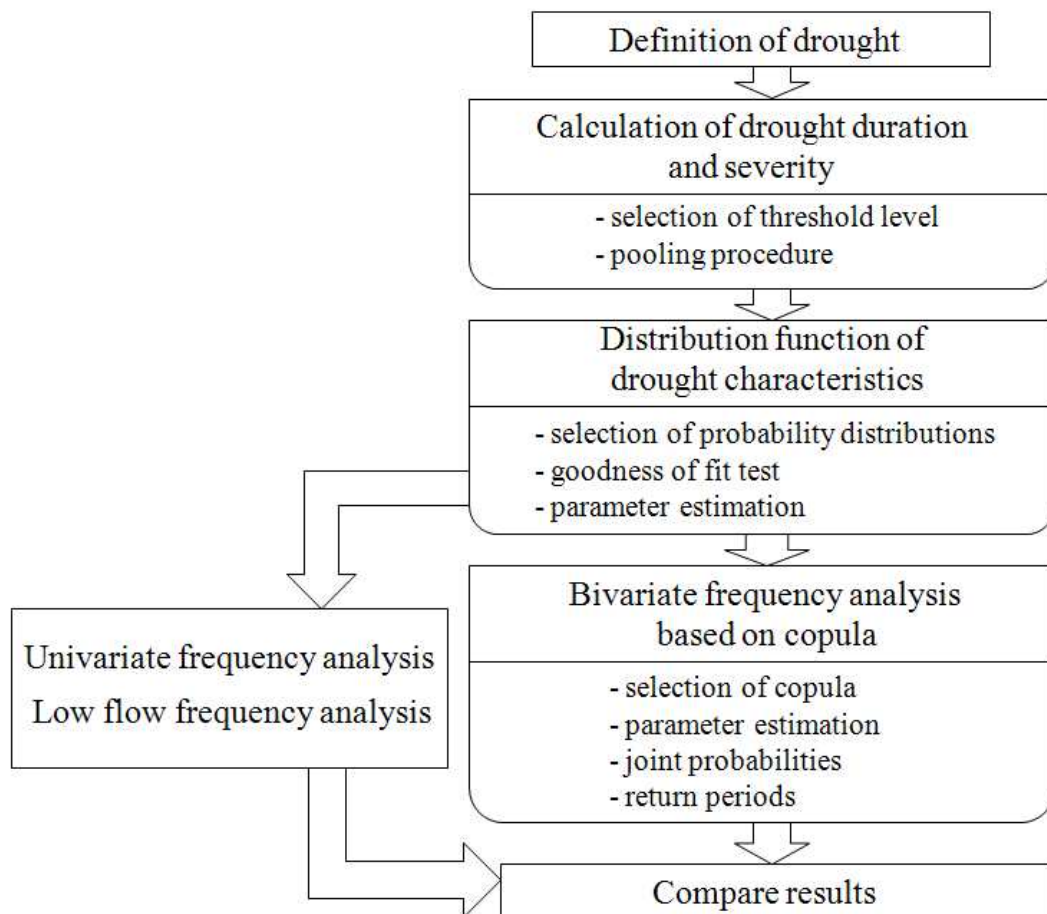


Figure 3.2 Procedure of the study

(drought inter-event time, t_i), 가뭄 사이의 초과용량(inter-event excess volume, v_i), 그리고 가뭄이 다시 발생하는 기간(drought inter-arrival time, l_i)을 구한다. 식(2.4, 2.5)를 이용하여 가뭄의 지속기간과 심도에 대하여 공동관리를 한다.

3.2.2 가뭄 지속기간과 심도의 확률분포형 결정

3.2.1절에서 계산된 가뭄 사상을 이용하여, 가뭄의 지속기간과 심도의 확률분포형을 결정하기 위해 계산된 각각의 가뭄특성을 Table 2.1에서 제시한 7가지 확률분포형인 normal 분포, lognormal 분포, exponential 분포, gamma 분포, Pareto 분포, GEV 분포, Weibull 분포에 대해 적합도 검정을 하였다.

가뭄의 지속기간이 이산형 확률변수라고 한다면 지속기간은 기하분포를 따르고(Kendall과 Dracup, 1992; Mathier 등, 1992), 지속기간을 연속적인 확률변수라고 한다면 지수분포를 따른다고 밝혔다(Lee 등, 1986; Zelenhastic과 Salvai, 1987). 그리고 가뭄의 심도는 많은 연구를 통해 감마분포를 따른다고 밝혀졌으나(Lee, 1987; Zelenhastic과 Salvai, 1987; Mathier 등, 1992; Shiau와 Shen, 2001) 본 연구에서는 각 관측지점에서 구한 가뭄사상의 지속기간과 심도에 대해 적합도 검정을 통해 확률분포형을 결정한다. 적합도 검정방법으로는 Chi-square test, Kolmogorov-Smirnov test, 그리고 Anderson-Darling test를 이용하였으며, 각각의 통계량을 구하고, 통계적 유의수준 20%, 10%, 5%, 그리고 1%에서의 값과 p-value (Anderson-Darling test 제외)를 비교하여 채택 여부를 정하여 검정을 수행하였다. 각각의 검정방법은 통계량의 크기가 작을수록 확률분포형이 가뭄의 지속기간과 심도를 표현하는데 적합함을 보여준다. 각각의 적합

도 검정법의 통계량과 유의수준에서 결과를 비교하여 가장 적합한 확률 분포형을 결정한다.

3가지 적합도 검정을 통해 선정된 확률분포형의 매개변수 추정을 위해 최우도추정법(MLE)과 L-Moment를 이용한다. 최우도추정법은 통계학적인 측면에서 적용의 다양성이나 통계학적 안정성에서 장점을 갖는다. 그러나 Park (2005)에 의하면 표본의 크기가 300 이상일 경우는 최우도추정법을, 표본의 크기가 300 이하일 경우는 L-moment를 사용할 것을 권장하였다. 이러한 이유로 본 연구에서는 L-moment를 이용한 매개변수 추정 결과 값을 이용하기로 한다.

3.2.3 일변량 빈도분석

가뭄의 지속기간과 심도의 확률분포형이 결정되면 누가분포함수를 이용하여 각각 지속기간과 심도에 대해 그 재현기간을 계산할 수 있다(식 2.79). 일변량 빈도분석은 가뭄의 지속기간과 심도가 서로 독립인 확률변수이므로 지속기간과 심도가 서로에게 영향을 미치지 않기 때문에 지속기간-빈도, 심도-빈도의 관계만을 보여준다.

3.2.4 저수량 빈도분석

표준화된 유량을 2.6.2절에서 설명한 절차를 따라 저수량 빈도분석을 한다. 본 연구에서는 유량자료를 표준화하여 빈도분석을 수행하였는데, 차후 copula를 이용한 이변량 빈도분석 결과와 비교하기 위하여 주천, 정선2, 평창, 그리고 영월1 지점의 표준화된 유량자료를 이용하여 저수량 빈도분석을 하였다. 2.6.2절의 (1)에서의 이동평균값은 가뭄의 지속기간과

비교를 하기 위하여 월단위로 1개월부터 7개월까지 수행하였다.

유량의 이동평균값을 이용하는 저수량 빈도분석은 가뭄의 심도를 다루는데 있어서 심도보다 강도의 개념에 가깝다. 그러나 지속기간이 매개변수로 이용되기 때문에 심도로 계산을 하여 copula를 이용한 이변량 빈도분석의 결과와 비교할 수 있다. 저수량 빈도분석은 강도-지속기간-빈도의 관계를 보여주며, copula를 이용한 빈도분석의 결과와 비교하기 위해 저수량 빈도분석의 강도는 심도로 변환하여 계산해야 한다..

3.2.5 Copula를 이용한 이변량 빈도분석

결정된 가뭄의 지속기간과 심도에 대한 Copula의 선정은 Akaike information criterion (AIC)을 이용하여 선정한다. AIC를 이용하여 2.7.2 절에서 열거한 copula (Clayton copula, Frank copula, Galambos copula, Gumbel-Hougaard copula, Plackett copula) 중에서 어떤 copula를 이용할 것인지 선정한다. 선정된 copula의 매개변수 θ_c 는 Joe (1997)가 제안한 IFM을 사용하여 추정한다.

Copula가 선정되고 매개변수가 구해지면 copula의 기본이론과 식 (2.71)을 이용하여 가뭄의 지속기간과 심도의 결합 누가분포함수를 계산할 수 있으며, 식(2.82, 2.83)을 이용하여 가뭄의 지속기간과 심도를 동시에 고려한 재현기간과 식(2.86, 2.87)을 이용하여 가뭄의 지속기간과 심도의 조건부 재현기간을 계산할 수 있다.

Copula를 이용한 이변량 빈도분석은 가뭄의 지속기간과 심도가 서로 독립이 아닌 확률변수로 일변량 빈도분석에서 지속기간과 심도를 동시에 고려하지 못하였던, 저수량 빈도분석에서는 지속기간이 매개변수로 이용되는 한계를 해결해준다.

3.2.6 SDF (severity-Duration-Frequency) 곡선

SDF 곡선은 식(2.90)을 이용하여 주천, 정선2, 평창, 그리고 영월1 지점에 대해 각각 구한다. 각 지점에서 계산한 가뭄사상의 평균 발생주기 $E(l)$ 와 본 연구에서 선정된 Clayton copula를 이용한 가뭄의 지속기간과 심도의 결합 누가분포함수를 통해 SDF 곡선을 그린다.

4. 적용 결과

4.1 가뭄의 지속기간과 심도의 계산

4.1.1 경향성 분석과 표준화

Table 4.1은 주천, 정선2, 평창, 그리고 영월1 지점의 유량 자료에 대해 경향성을 분석한 결과를 보여준다. Linear regression test의 경우 주천, 정선2, 평창, 그리고 영월1 지점의 유량 자료의 기울기가 각각 0.0005 (Figure A.1), -0.0003 (Figure A.4), -0.0002 (Figure A.7), 그리고 -0.0027 (Figure A.10)이며, t -test(귀무가설: 기울기는 0, 대립가설: 기울기는 0이 아님) 결과 신뢰수준 95%에서 경향성이 없는 것으로 나타났다. Hotelling-Pabst test와 Mann-Kendall test(귀무가설: 경향성 없음, 대립가설: 경향성 있음)에서도 통계량이 한계치(critical value) 내로 산정되어 95% 신뢰수준에서 경향성이 없는 것으로 나타났다. 3가지 test 결과 모두 경향성이 없는 것으로 확인되었다. Appendix A의 Figure들은 각 지점의 유량 자료, 표준화된 유량 자료, 그리고 표준화된 유량에 절단수준을 적용한 자료를 보여주고 있다.

4.1.2 절단수준의 선정

Table 4.2는 주천, 정선2, 평창, 그리고 영월1 지점의 절단수준으로 선정된 월별 유황곡선의 75%에 해당하는 표준화된 유량을 보여준다. 각 지점에서의 월평균 유량을 살펴보면 동절기인 12월부터 2월 사이의 값이 작고, 비교적 비가 많이 오는 7월부터 9월 사이의 값이 높은 우리나라의 계절적인

Table 4.1 Trend analysis using linear regression, Hotelling-Pabst, and Mann-Kendall test

Site	Linear regression		Hotelling-Pabst		Mann-Kendall	
	t (statistics)	critical value	Z (statistics)	critical value	Z (statistics)	critical value
JC	0.004	2.00	1.84	1.96	0.67	1.96
JS2	0.005	2.00	0.75	1.96	0.29	1.96
PC	0.002	2.00	1.02	1.96	0.48	1.96
YW1	0.008	2.00	0.82	1.96	0.31	1.96

JC: Jucheon, JS2: Jeongseon 2, PC: Pyeongchang, YW1: Yeongwol 1

Table 4.2 Calculated values of monthly streamflow and threshold levels for this study

Site	monthly streamflow	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
JC	mean (m ³ /s)	4.39	5.24	8.20	13.62	9.69	8.96	30.35	21.24	15.87	6.77	5.66	5.03
	standard deviation	3.34	4.34	6.06	15.88	7.19	8.21	34.62	16.87	16.01	4.78	4.19	3.84
	75% of flow duration curve for standardized streamflow	-0.686	-0.620	-0.663	-0.519	-0.683	-0.680	-0.517	-0.701	-0.614	-0.603	-0.661	-0.657
JS2	mean (m ³ /s)	18.81	22.56	37.52	58.70	46.95	40.92	99.28	83.08	71.02	36.25	27.02	22.50
	standard deviation	13.05	17.51	23.60	42.41	29.28	33.52	101.31	51.25	53.00	25.02	19.10	15.58
	75% of flow duration curve for standardized streamflow	-0.705	-0.890	-0.778	-0.503	-0.551	-0.649	-0.560	-0.614	-0.715	-0.755	-0.734	-0.924
PC	mean (m ³ /s)	13.23	14.36	18.36	26.01	25.35	21.76	53.49	41.97	34.53	19.72	16.84	15.60
	standard deviation	7.47	8.65	10.13	18.41	16.51	14.53	46.44	20.76	22.84	11.96	9.41	12.03
	75% of flow duration curve for standardized streamflow	-0.639	-0.649	-0.554	-0.614	-0.571	-0.829	-0.593	-0.658	-0.736	-0.686	-0.659	-0.569
YW1	mean (m ³ /s)	24.78	27.07	36.34	62.13	57.21	57.23	160.45	129.77	95.66	42.46	32.41	26.61
	standard deviation	25.06	28.41	33.25	42.32	35.47	54.15	112.04	91.69	82.59	36.29	33.11	24.06
	75% of flow duration curve for standardized streamflow	-0.710	-0.755	-0.705	-0.860	-0.789	-0.606	-0.817	-0.521	-0.677	-0.737	-0.650	-0.745

JC: Jucheon, JS2: Jeongseon 2, PC: Pyeongchang, YW1: Yeongwol 1

특징을 보여주고 있다. 주천의 동절기 월평균 유량은 $5 \text{ m}^3/\text{s}$ 정도로 영월1의 동절기 유량에 비해 비교적 낮게 측정되었고, 전체적인 값을 비교하였을 때는 영월1, 정선2, 평창, 그리고 주천 순으로 유량이 많이 흐르는 것을 확인할 수 있다.

4.1.3 가뭄 지속기간과 심도

우리나라의 저수량에 해당하는 월별 유황곡선의 75%를 기준으로 절단수준과 pooling method를 이용하고, 각 관측지점의 유량자료를 이용하여 각각의 적용기간에 맞춰 크고 작은 가뭄사상을 정의하였다.

주천, 정선2, 평창, 그리고 영월1 지점의 월단위 유량은 Appendix A의 Figure A.1, A.4, A.7, A10과 같고, 월단위의 유량을 식(2.16)을 이용하여 표준화한 것이 Appendix A의 Figure A.2, A.5, A.8, A11이다. 표준화된 유량 자료는 대략 $-2 \sim 6$ 의 범위를 갖고 있으며, (-)값을 갖는 유량은 평균값보다 적음을 나타내어 물 부족으로 볼 수 있다. 그러나 그 값이 작으면 가벼운 물 부족 현상으로 판단할 수 있으며, 가뭄으로 생각하기 힘들다. 본 연구에서는 유황곡선의 75%에 해당하는 유량을 절단수준으로 선정하고 이를 기준으로 가뭄을 구분하였다. 절단수준을 이용하여 자료를 다시 정리하면 Appendix A의 Figure A.3, A.6, A.9, A12를 얻을 수 있으며, 이 자료를 이용하여 가뭄사상을 구할 수 있다.

절단수준을 이용하여 얻은 가뭄사상은 pooling method를 이용하여 가뭄의 지속기간과 심도에 대해 다시 정의를 한다. 가뭄의 지속기간을 계산하는데 영향을 주는 식(2.6)에서의 한계 지속기간(t_c)은 2 개월, 가뭄의 심도를 계산하는데 영향을 주는 식(2.7)에서의 부족용량비(z_i)는 0.5이다.

Table 4.3은 각 지점의 가뭄사상에 대한 표이며, Table 4.4는 유량 자료와 정의된 가뭄사상에 대한 기본적인 통계 분석표이다. 심도의 최대값을 비교해보면, 평창이 15.503으로 가장 크고, 정선2가 12.120, 주천이 8.942, 그리고 영월1이 3.597로 가장 작다. 영월1 지점은 다른 지점에 비해 월평균 유량이 가장 큰 것과 반대로 심도는 가장 작게 측정되었다.

각 지점에서 가뭄사상과 가장 심했던 가뭄을 보면, 주천은 총 49년의 기간 동안 38개의 가뭄사상이 정의되었으며, 가장 심했던 가뭄은 1987년에 시작한 것으로 지속기간이 29개월, 심도가 8.942인 것으로 나타났다. 정선2는 총 50년의 기간 동안 37개의 가뭄사상이 정의되었으며, 가장 심했던 가뭄은 1987년에 시작한 것으로 지속기간이 27개월, 심도가 12.120이었다. 평창은 총 54년의 기간동안 39개의 가뭄사상이 정의되었으며, 지속기간이 24개월, 심도가 15.503인 가뭄이 1993년에 시작되었다. 영월1은 총 37년의 기간동안 24개의 가뭄사상이 정의되었고, 지속기간이 28개월, 심도가 3.597인 가뭄이 2000년에 발생하였다.

또한, 각 지점의 가뭄사상에 대해 가뭄 지속기간과 심도의 상관관계를 분석한 것을 Figure 4.1에 도시하였으며, 가뭄 지속기간과 심도의 상관관계수는 모두 0.90 이상으로 높은 상관관계를 보이고 있다.

4.2 가뭄 특성의 분포형 결정

4.2.1 적합도 검정

가뭄 지속기간과 심도에 확률분포형을 적용한 적합도 검정결과는 Appendix B에서 확인할 수 있다. 각각의 검정방법은 통계량이 작을수록 확률분포형이 가뭄의 지속기간과 심도를 표현하는데 적합함을 보여준다.

Table 4.3 Streamflow drought events and their duration and severity

(a) Jucheon

No.	Onset (month - year)	Duration (months)	Standardized severity
1	Dec-1962	4	0.371
2	Aug-1963	8	1.245
3	Mar-1965	20	2.524
4	May-1967	6	0.333
5	May-1968	5	0.597
6	Jun-1969	2	0.048
7	Apr-1970	2	0.160
8	Feb-1971	5	0.460
9	Sep-1971	3	0.203
10	Jun-1972	2	0.264
11	Jul-1976	1	0.008
12	Nov-1981	1	0.226
13	Jul-1982	1	0.221
14	Aug-1983	8	3.649
15	Oct-1984	10	2.418
16	Nov-1985	3	0.514
17	Apr-1986	1	0.013
18	Sep-1986	3	0.096
19	May-1987	1	0.099
20	Sep-1987	29	8.942
21	Aug-1990	1	0.317
22	Jan-1991	1	0.334
23	Aug-1991	1	0.038
24	Jul-1992	1	0.115
25	Aug-1994	1	0.019
26	Feb-1995	1	0.049
27	Jun-1995	1	0.008
28	Jul-1997	1	0.087
29	Mar-2000	2	0.096
30	Jul-2000	1	0.046
31	Apr-2001	2	0.273
32	Sep-2001	1	0.143
33	Mar-2002	1	0.096
34	Mar-2003	1	0.621
35	May-2008	12	2.642
36	Sep-2009	9	1.468
37	Dec-2010	4	0.611
38	Oct-2011	1	0.096

Table 4.3 Streamflow drought events and their duration and severity
(continued) (b) Jeongseon 2

No.	Onset (month - year)	Duration (months)	Standardized severity
1	Mar-1963	1	0.193
2	Jan-1967	2	0.337
3	Nov-1969	2	0.529
4	Jan-1973	3	0.889
5	Jul-1973	2	0.292
6	Jul-1975	1	0.081
7	Nov-1975	2	0.465
8	Jul-1976	1	0.081
9	Nov-1976	12	3.687
10	Apr-1978	10	1.942
11	Mar-1981	2	0.517
12	Aug-1981	1	0.338
13	Apr-1982	1	0.044
14	Jul-1982	3	0.160
15	Jun-1983	2	0.039
16	Jun-1985	3	0.303
17	Aug-1986	1	0.290
18	Mar-1987	1	0.404
19	Sep-1987	27	12.120
20	Aug-1990	3	0.268
21	Jan-1991	6	0.795
22	Nov-1991	14	3.237
23	Aug-1993	11	1.684
24	Feb-1995	1	0.275
25	Aug-1996	1	0.229
26	Aug-1998	1	0.126
27	Jan-1999	3	1.040
28	Jul-1999	1	0.208
29	Feb-2000	6	1.608
30	May-2001	2	0.833
31	Apr-2004	1	0.141
32	Aug-2005	1	0.151
33	Sep-2006	1	0.114
34	May-2007	2	0.143
35	Sep-2007	28	8.746
36	Jun-2010	10	2.435
37	Oct-2011	1	0.170

Table 4.3 Streamflow drought events and their duration and severity
(continued) (c) Pyeongchang

No.	Onset (month - year)	Duration (months)	Standardized severity
1	Aug-1960	2	0.653
2	Mar-1962	1	0.108
3	Jul-1962	1	0.187
4	Mar-1963	7	1.987
5	May-1964	4	2.561
6	Dec-1964	14	1.739
7	Apr-1966	2	1.131
8	Nov-1966	1	0.379
9	Apr-1967	1	0.184
10	Jul-1967	2	0.454
11	Jul-1968	1	0.083
12	Jan-1969	2	0.319
13	Jun-1969	2	0.273
14	Dec-1969	7	4.608
15	Oct-1970	1	0.280
16	Jan-1971	6	3.643
17	Jul-1976	1	0.024
18	Aug-1977	1	0.114
19	Jul-1980	6	3.678
20	Jan-1983	5	3.844
21	Sep-1983	1	0.478
22	Nov-1984	2	1.236
23	Sep-1985	3	1.901
24	Jan-1993	24	15.503
25	Aug-1996	2	0.114
26	Feb-1999	1	0.034
27	Jul-1999	1	0.083
28	Oct-1999	13	9.918
29	May-2001	1	0.214
30	Aug-2001	2	0.613
31	Oct-2004	2	0.560
32	Mar-2005	3	1.072
33	Nov-2005	5	1.904
34	Aug-2006	4	2.010
35	Jun-2007	1	0.122
36	Nov-2007	19	8.042
37	Sep-2009	2	0.366
38	Apr-2010	13	4.104
39	Sep-2011	4	1.750

Table 4.3 Streamflow drought events and their duration and severity
(continued) (d) Yeongwol 1

No.	Onset (month - year)	Duration (months)	Standardized severity
1	Jul-1976	2	0.350
2	Jul-1977	2	0.350
3	Mar-1980	1	0.119
4	May-1981	4	0.507
5	Jul-1982	1	0.234
6	Jul-1985	1	0.170
7	Aug-1988	1	0.024
8	Aug-1994	1	0.254
9	May-1996	1	0.226
10	Sep-1996	8	0.643
11	Sep-1997	2	0.328
12	Mar-1998	13	1.104
13	Jul-1999	1	0.141
14	Apr-2000	28	3.597
15	Nov-2002	1	0.053
16	Apr-2004	1	0.242
17	Nov-2004	7	0.502
18	Mar-2006	1	0.007
19	Aug-2006	6	1.372
20	Jun-2007	1	0.173
21	Dec-2007	23	2.842
22	Jun-2010	2	0.423
23	Nov-2010	6	0.368
24	Aug-2011	2	0.090

Table 4.4 Basic statistics of streamflow and droughts

(a) Jucheon

Streamflow	Mean annual streamflow (m ³ /s)		11.23
	Standard deviation (m ³ /s)		15.45
	Coefficient of variation		1.376
Drought	No. of droughts (1963-2012)		38
	Average inter-arrival time (month)		15.472
	Duration (month)	Maximum	29
		Minimum	1
		Mean	4.131
		Standard deviation	5.761
	Standardized severity	Maximum	8.942
		Minimum	0.008
		Mean	0.775
		Standard deviation	1.609

(b) Jeongseon 2

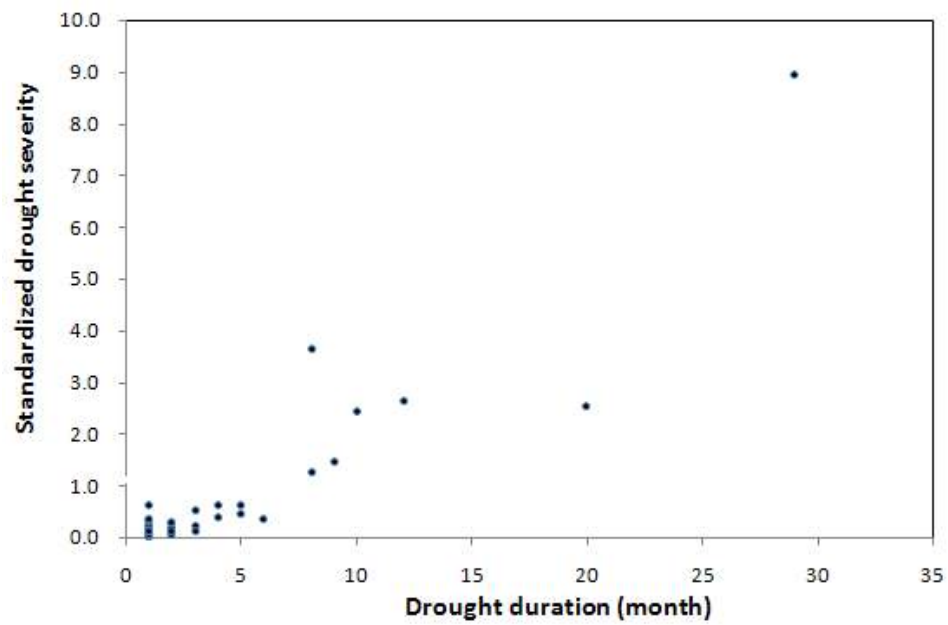
Streamflow	Mean annual streamflow (m ³ /s)		47.05
	Standard deviation (m ³ /s)		48.94
	Coefficient of variation		1.040
Drought	No. of droughts (1962-2012)		37
	Average inter-arrival time (month)		16.212
	Duration (month)	Maximum	28
		Minimum	1
		Mean	4.594
		Standard deviation	6.576
	Standardized severity	Maximum	12.11
		Minimum	0.039
		Mean	1.213
		Standard deviation	2.433

Table 4.4 Basic statistics of streamflow and droughts (continued)
(c) Pyeongchang

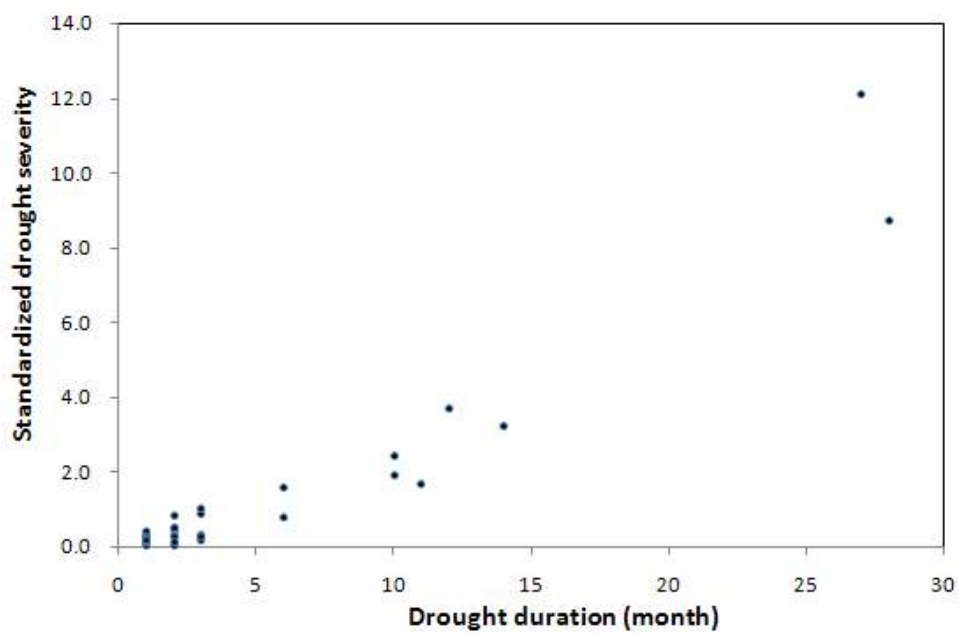
Streamflow	Mean annual streamflow (m ³ /s)		25.10
	Standard deviation (m ³ /s)		22.63
	Coefficient of variation		0.901
Drought	No. of droughts (1958-2012)		39
	Average inter-arrival time (month)		16.615
	Duration (month)	Maximum	24
		Minimum	1
		Mean	4.358
		Standard deviation	5.303
	Standardized severity	Maximum	15.50
		Minimum	0.024
		Mean	1.955
		Standard deviation	3.111

(d) Yeongwol 1

Streamflow	Mean annual streamflow (m ³ /s)		62.68
	Standard deviation (m ³ /s)		70.47
	Coefficient of variation		1.12
Drought	No. of droughts (1975-2012)		24
	Average inter-arrival time (month)		18.499
	Duration (month)	Maximum	28
		Minimum	1
		Mean	4.833
		Standard deviation	7.081
	Standardized severity	Maximum	3.597
		Minimum	0.007
		Mean	0.588
		Standard deviation	0.878

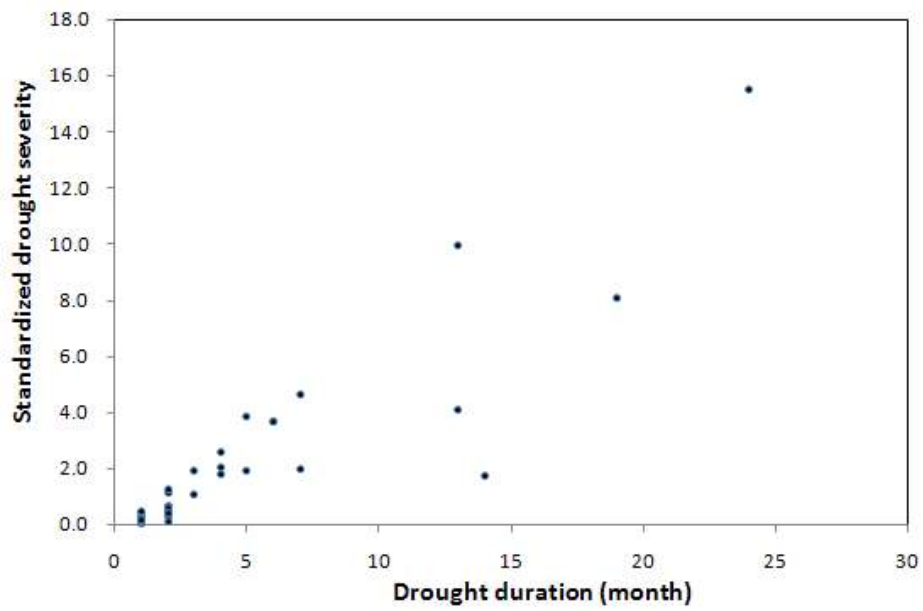


(a) Jucheon

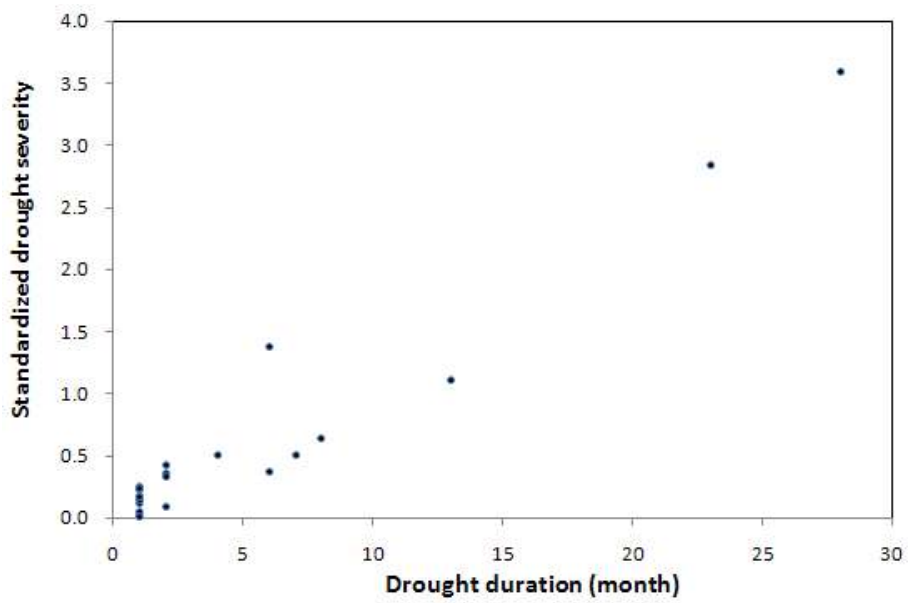


(b) Jeongseon 2

Figure 4.1 Scatter plot of observed drought duration and standardized drought severity



(c) Pyeongchang



(d) Yeongwol 1

Figure 4.1 Scatter plot of observed drought duration and standardized drought severity (continued)

주천 지점의 가뭄 지속기간은 각 검정법에서 통계량 크기가 가장 작은 확률분포형이 각각 Gamma 분포, Pareto 분포, 그리고 Weibull 분포로 확인되지만, Pareto 분포가 평균적으로 값이 낮은 것을 확인할 수 있어, 주천의 지속기간의 확률분포형으로 선정되었다. 심도는 세가지 검정법에서 모두 lognormal 분포가 가장 적합하다는 결과를 보였다. 정선2 지점의 지속기간은 각각 검정법에 의해 Weibull 분포, Pareto 분포, 그리고 GEV 분포가 가장 작은 통계량을 보였는데, 평균적으로 보았을 때 GEV 분포가 다른 확률분포형에 비해 통계량이 작아서 정선2의 지속기간에 대한 확률분포형으로 선정되었다. 정선2의 심도는 K-S test에서 GEV 분포가 가장 작은 통계량을 보이고, 나머지 두 검정법에서는 lognormal 분포가 가장 작은 통계량을 보인다. 평균적으로 값이 작은 lognormal 분포가 선택되었다. 평창의 평창의 지속기간은 Chi-squared test, 심도는 K-S test에서 Weibull 분포가 가장 작은 통계량을 보였으나, 전반적으로 본 결과, 지속기간은 GEV 분포로 선정되었고, 심도는 lognormal 분포로 결정되었다. 영월1의 지속기간은 A-D test에서, 심도는 K-S test에서 Pareto 분포가 가장 작은 통계량을 보이지만, 각각 다른 두 검정법에 의해 지속기간은 Weibull 분포, 심도는 GEV 분포가 가장 적합하다는 결과를 보여 해당 지점의 확률분포형으로 선정되었다.

Table 4.5는 각각 주천, 정선2, 평창, 그리고 영월1 지점에서 적합도 검정 결과(Appendix B)를 이용하여 각 지점에서의 1 ~ 3 순위로 적합한 확률분포형을 표시하였다. 본 연구에서 4개 지점에서의 적합도 검정 결과를 1위부터 3위까지 표기한 결과, 지속기간의 경우는 Weibull 분포가 모든 지점에서 3 순위까지 적절하다는 것을 확인 할 수 있었다. 심도의 경우에는 lognormal 분포, GEV 분포, 그리고 Weibull 분포가 모든 지점에서 각각 1 ~ 3 순위로 적합하다는 결과를 보이고 있다. Table 4.5를 보

Table 4.5 Ranking of the distribution for drought duration and drought severity

Variable	Rank	Jucheon	Jeongseon 2	Pyeongchang	Yeongwol 1
duration D	1	Pareto	GEV	GEV	Weibull
	2	Weibull	lognormal	Exponential	GEV
	3	Exponential	Weibull	Weibull	lognormal
severity S	1	lognormal	lognormal	lognormal	GEV
	2	Weibull	GEV	Weibull	lognormal
	3	GEV	Weibull	GEV	Weibul

면 주천, 정선2, 평창, 그리고 영월1 지점에서 지속기간의 경우는 Weibull 분포를 이용하고, 심도는 lognormal 분포(주천, 정선2, 그리고 평창에서 1순위, 영월1에서 2순위)를 확률분포형으로 적용하는 것이 좋다는 것을 확인 할 수 있다. 그러나 4개 지점의 자료만으로 4개 지점을 대표할 확률분포형을 결정하는 것은 무리가 있다고 판단하여, 본 연구에서는 각각 4개의 지점에서 각각 1순위로 적합하다고 결과가 나온 확률분포형을 선택하였다.

4.2.2 매개변수 추정

가뭄의 지속기간과 심도를 확률분포형에 적용하였을 때 각각 확률밀도함수의 매개변수추정은 L-moment로 하였으며, Table 4.6은 각 지점에서 가뭄 지속기간과 심도의 확률밀도함수에 대해 추정된 매개변수를 보여준다. 최우도 추정법과 L-moment를 이용한 매개변수 추정 결과 값은 큰 차이를 보이지 않지만, Park (2005)에 근거하여 L-moment를 이용한 매개변수 추정값을 결과로 이용하였다. 각 지점에서 선정된 가뭄의 지속기간과 심도에 대한 누가분포함수에 추정된 매개변수를 대입하여 정리하면 식(4.1 ~ 4.4)로 나타낼 수 있다. 식(4.1), 식(4.2), 식(4.3), 그리고 식(4.4)는 각각 주천, 정선2, 평창, 그리고 영월 1 지점에서의 가뭄의 지속기간(a)과 심도(b)에 대한 주변 누가분포함수이다.

$$F_D(d) = 1 - \left(\frac{0.97887}{d} \right)^{1.2234} \quad (4.1a)$$

$$F_S(s) = \int_{-\infty}^{\ln s} \frac{1}{\sqrt{2\pi(1.5546)^2}} e^{-\frac{(\ln s + 1.6232)^2}{2(1.5546)^2}} d(\ln s) \quad (4.1b)$$

Table 4.6 Estimated parameters of distributions

(a) Jucheon

Distribution	Parameter	Method	
		MLE	L-M
Pareto (drought duration)	α	1.1856	1.2234
	β	1.0000	0.97887
Lognormal (standardized drought severity)	σ	1.6301	1.5546
	μ	-1.5198	-1.6232
	γ	0	0

(b) Jeongseon 2

Distribution	Parameter	Method	
		MLE	L-M
GEV (drought duration)	κ	3.6740	0.60084
	σ	0.0061	1.4494
	μ	1.0017	1.6444
Lognormal (standardized drought severity)	σ	1.3529	1.4156
	μ	-0.8631	-0.9524
	γ	0	0

Table 4.6 Estimated parameters of distributions (continued)

(c) Pyeongchang

Distribution	Parameter	Method	
		MLE	L-M
GEV (drought duration)	κ	4.3650	0.5139
	σ	0.0304	1.5765
	μ	1.0070	1.8356
Lognormal (standardized drought severity)	σ	1.5778	1.4751
	μ	-0.3912	-0.6251
	γ	0	0

(d) Yeongwol 1

Distribution	Parameter	Method	
		MLE	L-M
Weibull (drought duration)	α	0.92833	0.8452
	β	3.8909	3.6215
	γ	0	0
GEV (standardized drought severity)	κ	0.6599	0.57158
	σ	0.2084	0.21066
	μ	0.1961	0.19446

$$F_D(d) = e^{-\left\{1 + 0.60084\left(\frac{d - 1.6444}{1.4494}\right)\right\}^{-1/0.60084}} \quad (4.2a)$$

$$F_S(s) = \int_{-\infty}^{\ln s} \frac{1}{\sqrt{2\pi(1.4156)^2}} e^{-\frac{(\ln s + 0.9524)^2}{2(1.4156)^2}} d(\ln s) \quad (4.2b)$$

$$F_D(d) = e^{-\left\{1 + 0.5139\left(\frac{d - 1.8356}{1.5765}\right)\right\}^{-1/0.5139}} \quad (4.3a)$$

$$F_S(s) = \int_{-\infty}^{\ln s} \frac{1}{\sqrt{2\pi(1.4751)^2}} e^{-\frac{(\ln s + 0.6251)^2}{2(1.4751)^2}} d(\ln s) \quad (4.3b)$$

$$F_D(d) = 1 - e^{-\left(\frac{d}{3.6215}\right)^{0.8452}} \quad (4.4a)$$

$$F_S(s) = e^{-\left\{1 + 0.57158\left(\frac{s - 0.19446}{0.21066}\right)\right\}^{-1/0.57158}} \quad (4.4b)$$

Figure 4.2부터 Figure 4.9는 실제 관측된 가뭄의 지속기간과 가뭄의 심도 그리고 가뭄 특성에 적용한 누가분포함수의 곡선을 비교한 것을 보여주고 있다. 식(4.1 ~ 4.4)를 실제 관측된 가뭄의 지속기간과 심도와 비교하면 오차는 있지만 비슷한 경향을 보이고 있는 것을 확인할 수 있다.

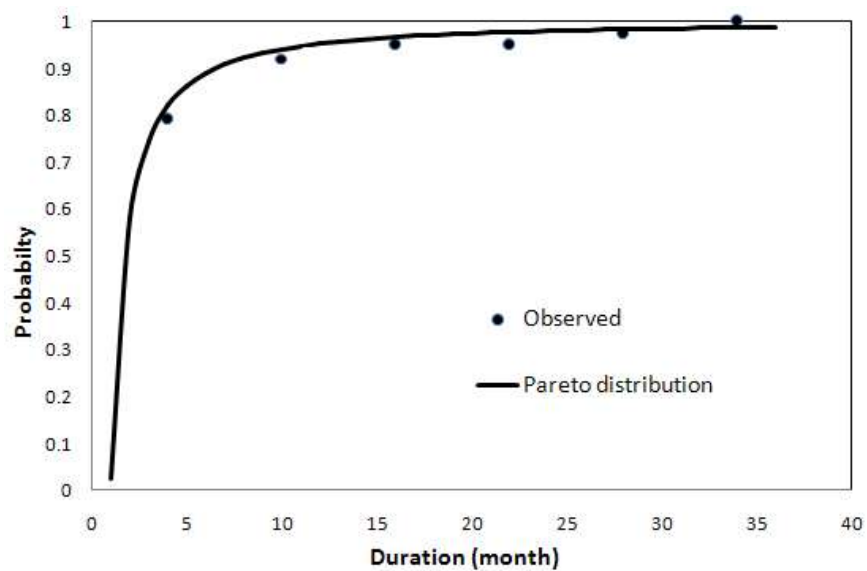


Figure 4.2 Comparison of the observed drought duration and the fitted distribution – Jucheon

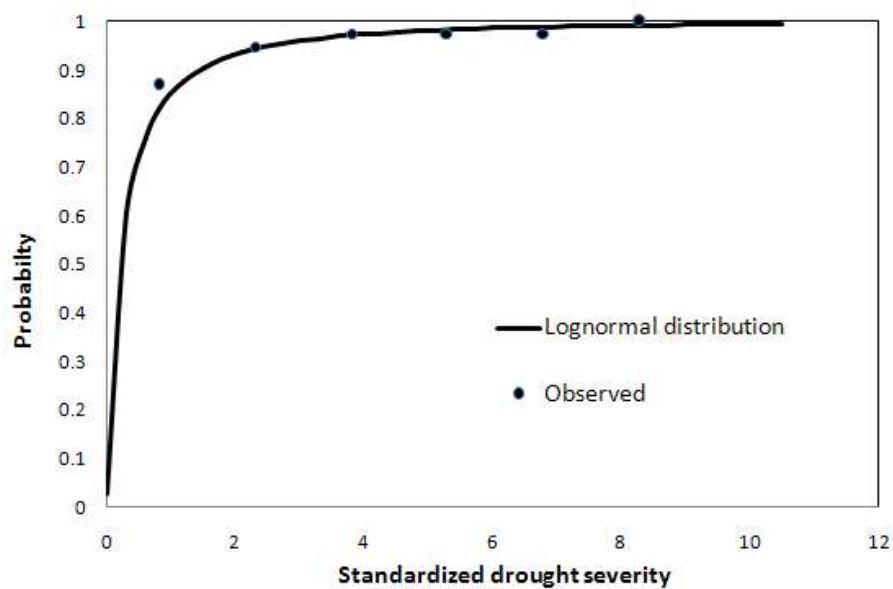


Figure 4.3 Comparison of the observed standardized drought severity and the fitted distribution – Jucheon

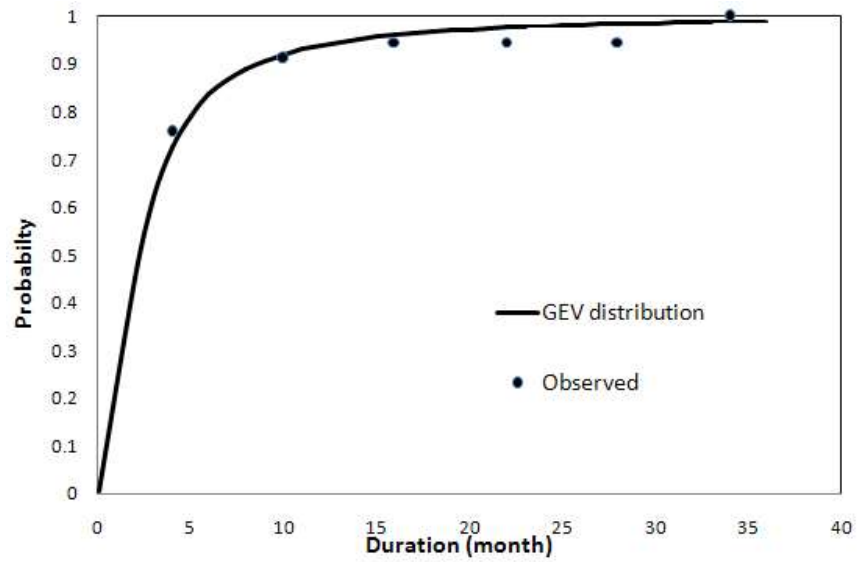


Figure 4.4 Comparison of the observed drought duration and the fitted distribution – Jeongseon 2

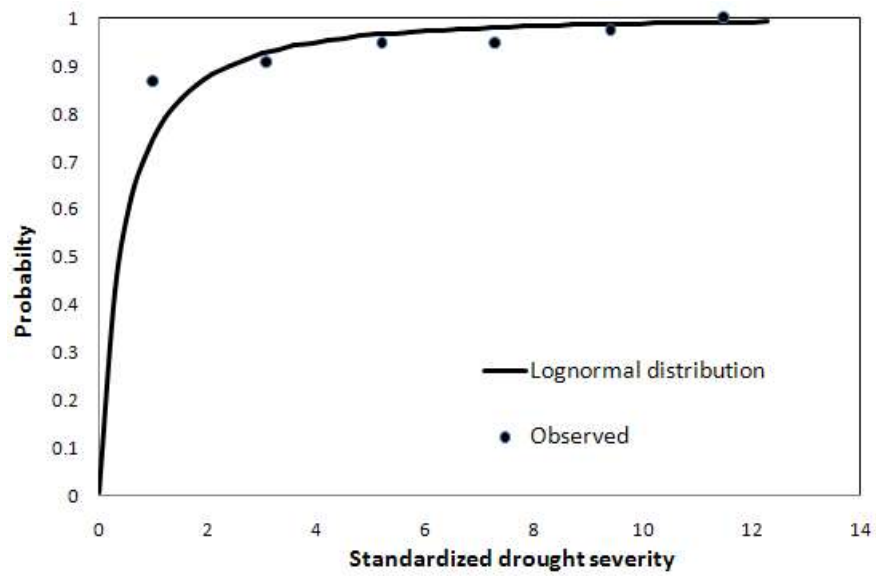


Figure 4.5 Comparison of the observed standardized drought severity and the fitted distribution – Jeongseon 2

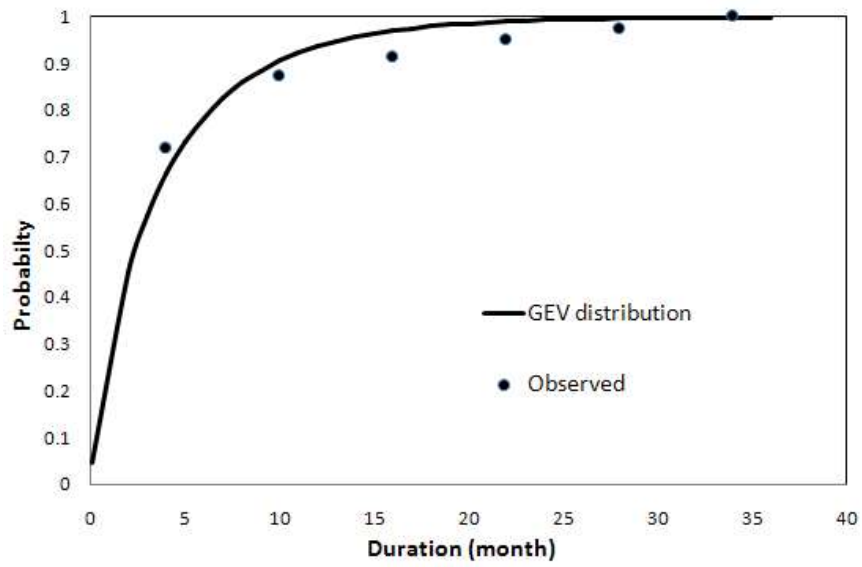


Figure 4.6 Comparison of the observed drought duration and the fitted distribution – Pyeongchang

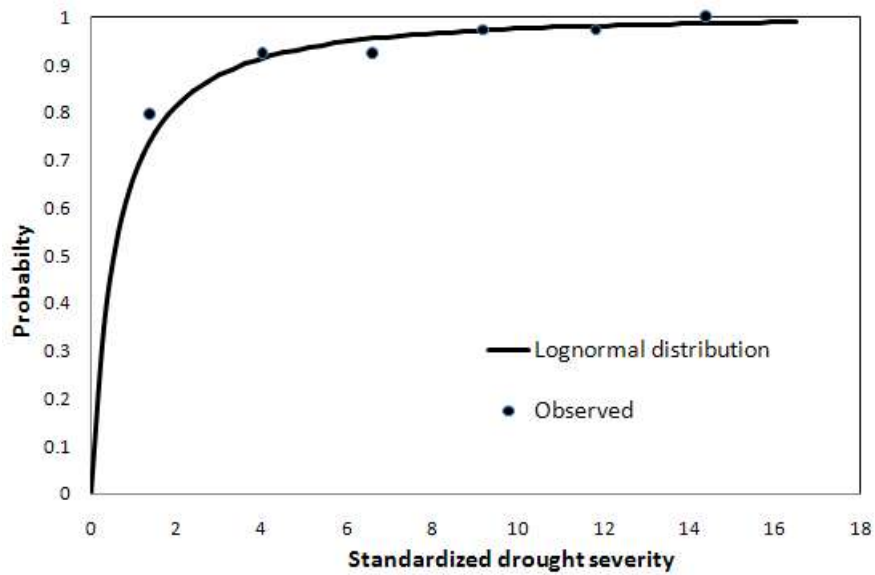


Figure 4.7 Comparison of the observed standardized drought severity and the fitted distribution – Pyeongchang

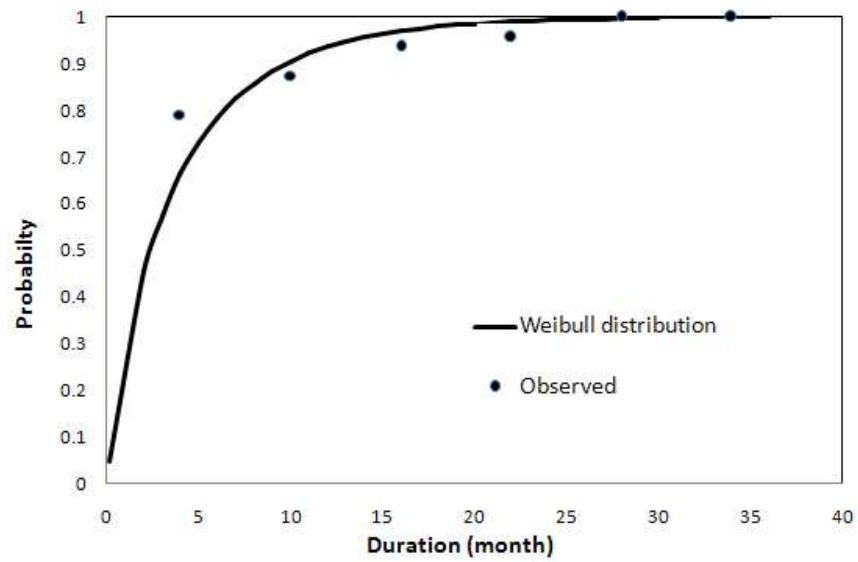


Figure 4.8 Comparison of the observed drought duration and the fitted distribution – Yeongwol 1

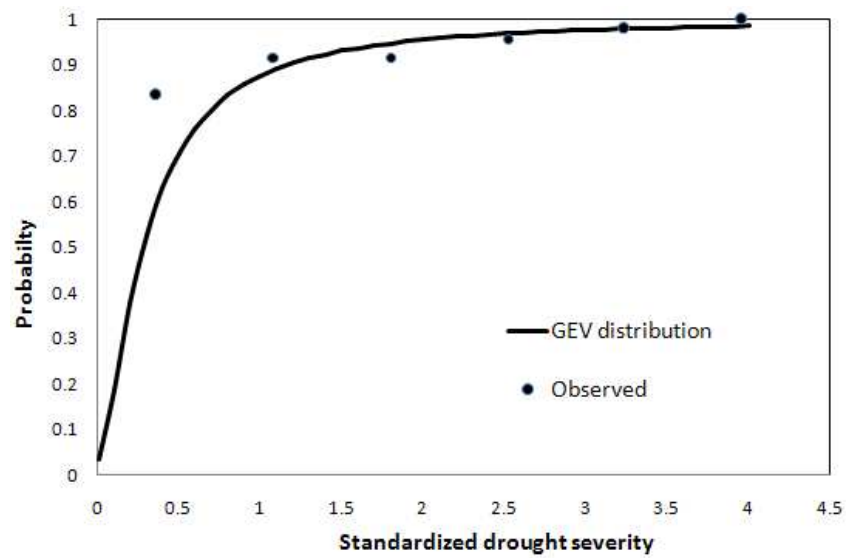


Figure 4.9 Comparison of the observed standardized drought severity and the fitted distribution – Yeongwol 1

4.3 Copula

4.3.1 Copula의 선정

각 지점에서 가뭄의 지속기간과 심도에 대한 copula의 AIC의 값과 copula 매개변수 θ_c 을 Table 4.7에서 확인할 수 있다. 결과적으로 AIC 값이 가장 작은 Clayton copula가 본 연구에서 다룬 모든 지점에 가장 적합한 copula로 선정이 되었으며, Clayton copula의 매개변수 θ_c 는 주천, 정선2, 평창, 그리고 영월1에서 각각 13.5704, 15.4113, 19.8668, 그리고 13.8558로 추정되었다.

4.3.2 가뭄 지속기간과 심도의 결합 누가분포함수

$C(u, v)$ 는 결합 누가분포함수와 주변 누가분포함수를 연결해주는 copula로, 본 연구에서는 결합 누가분포함수와 주변 누가분포함수를 연결하는 Clayton copula이다. 주천(a), 정선2(b), 평창(c), 그리고 영월1(d) 지점에 대해 가뭄의 지속기간과 심도의 결합 누가분포함수를 식(2.60)과 같이 Clayton copula의 형태로 표현할 수 있다.

$$F_{D,S}(d, s) = C(F_D(d), F_S(s)) \quad (4.5a)$$

$$= [(F_D(d))^{-13.5704} + (F_S(s))^{-13.5704} - 1]^{-1/13.5704}$$

$$F_{D,S}(d, s) = C(F_D(d), F_S(s)) \quad (4.5b)$$

$$= [(F_D(d))^{-15.4113} + (F_S(s))^{-15.4113} - 1]^{-1/15.4113}$$

Table 4.7 AIC values and estimated copula parameter

Site	Copula	AIC	θ_c
Jucheon	Clayton	-175.4	13.750
	Frank	-168.5	
	Galambos	-169.4	
	Gumbel-Hougaard	-172.9	
	Plackett	-170.1	
Jeongseon 2	Clayton	-191.3	15.411
	Frank	-188.1	
	Galambos	-181.5	
	Gumbel-Hougaard	-178.7	
	Plackett	-185.6	
Pyeongchang	Clayton	-219.2	19.867
	Frank	-214.3	
	Galambos	-207.7	
	Gumbel-Hougaard	-216.5	
	Plackett	-209.2	
Yeongwol 1	Clayton	-185.5	13.856
	Frank	-175.2	
	Galambos	-181.3	
	Gumbel-Hougaard	-177.9	
	Plackett	-179.7	

$$F_{D,S}(d, s) = C(F_D(d), F_S(s)) \quad (4.5c)$$

$$= [(F_D(d))^{-19.8668} + (F_S(s))^{-19.8668} - 1]^{-1/19.8668}$$

$$F_{D,S}(d, s) = C(F_D(d), F_S(s)) \quad (4.5d)$$

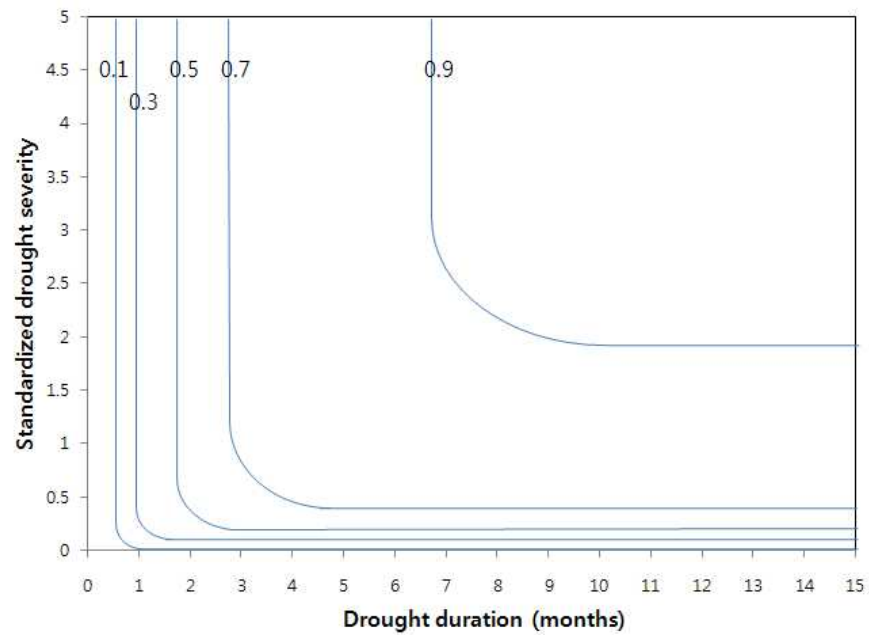
$$= [(F_D(d))^{-13.8558} + (F_S(s))^{-13.8558} - 1]^{-1/13.8558}$$

여기서, $F_D(d)$ 와 $F_S(s)$ 는 각각 가뭄의 지속기간과 가뭄의 심도에 대한 주변 누가분포함수이다. Figure 4.10은 식(4.5)를 이용하여 계산한 Clayton copula, 가뭄의 지속기간과 심도에 대한 결합 누가분포함수를 보여준다.

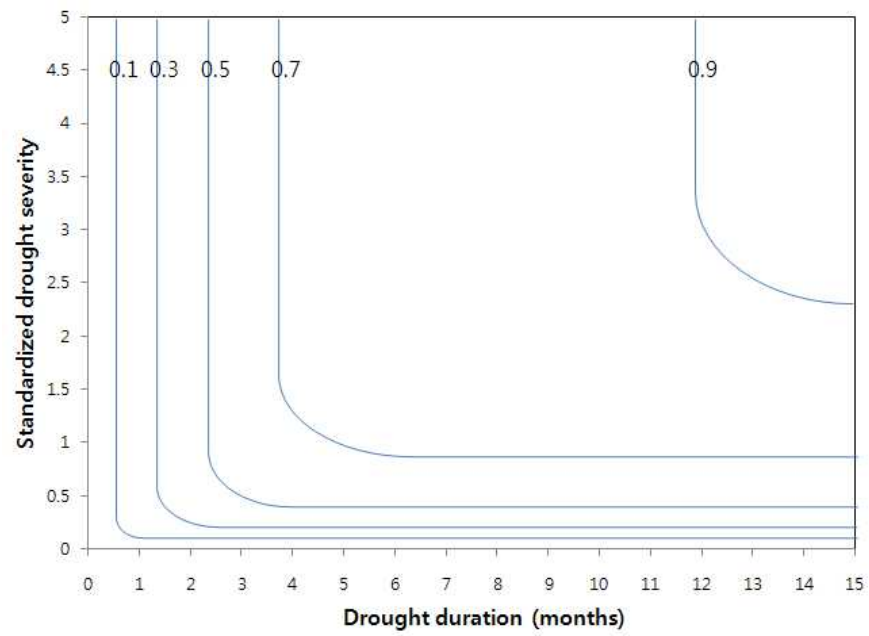
4.4 가뭄의 재현기간

4.4.1 일변량 빈도분석

식(2.79)를 이용하여 가뭄의 지속기간과 심도 각각에 대한 재현기간을 계산할 수 있다. 가뭄사상의 평균 발생주기인 $E(l)$ 은 절단수준법을 이용하여 가뭄사상을 정의할 때 그 값을 계산할 수 있다. 그 결과, 가뭄이 다시 발생하는 평균 기간 $E(l)$ 은 주천, 정선2, 평창, 그리고 영월1 지점에 대해 각각 15.472, 16.212, 16.615, 그리고 18.499 (months)로 계산되었다. 가뭄이 다시 발생하는 평균 기간의 값을 보면, 가뭄이 15~18 개월마다 한번 발생하는 것으로 확인된다. 실제로 우리가 느끼는 가뭄은 본 연구 결과에서와 같이 자주 발생하지는 않는다. 대하천의 경우는 항상 물이 많이 흐르기 때문에 절단수준을 갈수량으로 잡고, 소하천의 경우는 물이 거의 흐르지 않는 경우도 있을 수 있기 때문에 절단수준을 저수량으로 잡는다. 본 연구에서는 절단수준을 저수량으로 하였기 때문에 가뭄이 다

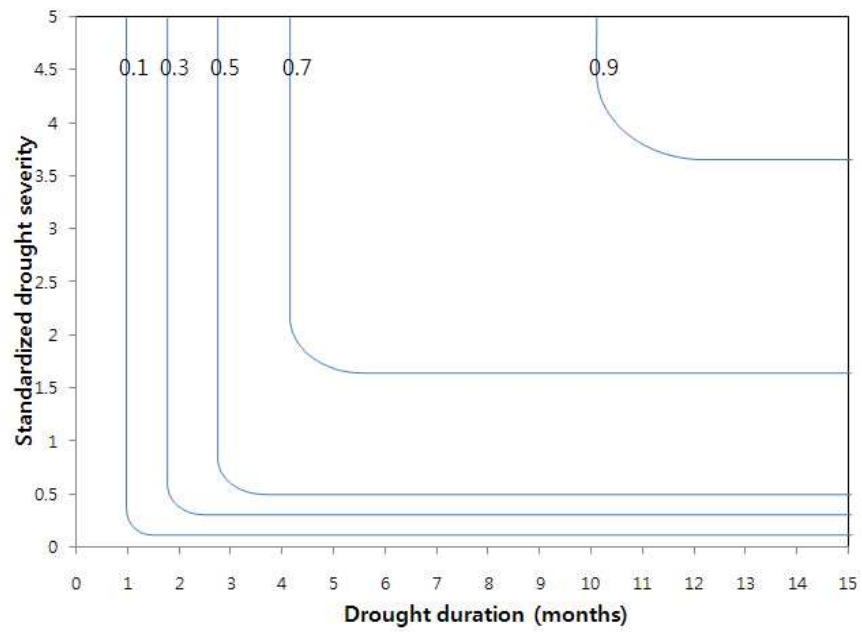


(a) Jucheon

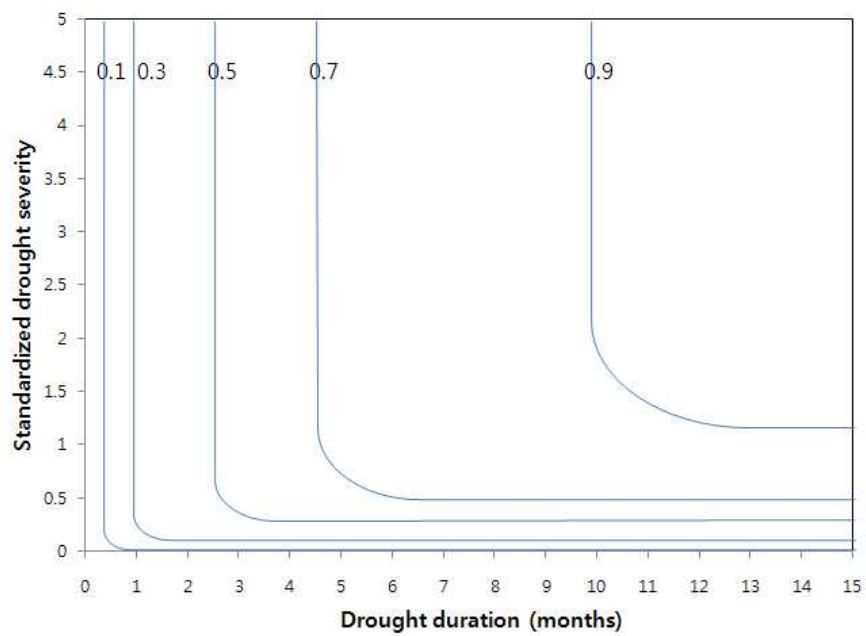


(b) Jeongseon 2

Figure 4.10 Contours of joint probability for drought duration and standardized drought severity



(c) Pyeongchang



(d) Yeongwol 1

Figure 4.10 Contours of joint probability for drought duration and standardized drought severity (continued)

시 발생하는 평균 기간의 값이 위와 같이 나왔으며, 향후 본 연구 지점에 적절한 절단수준을 구할 필요가 있겠다. Table 4.8은 식(4.1), 식(4.2), 식(4.3), 식(4.4), 그리고 식(2.79)를 이용하여 계산되었으며, 2년, 5년, 10년, 20년, 50년, 그리고 100년 빈도의 가뭄에 해당하는 가뭄 지속기간과 심도를 보여준다. 본 연구에서 가뭄의 지속기간과 재현기간에 대한 계산은 월단위로 계산하였고, 실제 우리가 사용하는 가뭄의 재현기간은 100년 빈도와 같이 연단위이기 때문에 재현기간의 결과 표기는 년(year)을 이용하였다.

4.4.2 저수량 빈도분석

각 지점의 유량 자료로부터 저수량 빈도분석을 하여 저수량 빈도곡선을 구하였다. Figure 4.11은 각각의 관측 지점의 표준화한 유량으로 계산한 저수량 빈도곡선이다. 저수량 빈도곡선은 지속기간을 매개변수로 하며, 재현기간과 강도(혹은 유량)에 대해서 확인 할 수 있다. 저수량 빈도곡선은 본 연구가 월단위의 유량자료를 이용하는 관계로 동일하게 월단위(1 ~ 12 개월 이동평균)로 계산하였다. 저수량 빈도분석 결과 이동평균 지속기간이 7 개월보다 길어지면 강도에 따른 재현기간의 값이 합당한 결과를 보이지 않기 때문에 지속기간 8 개월부터의 자료를 이용하지 않았다(Appendix C).

4.4.3 Copula를 이용한 이변량 빈도분석

Figure 4.12와 Figure 4.13은 각각 식(2.82)와 식(2.83)으로 표현되는 재현기간 T_{DS} 와 T'_{DS} 를 도식하고 있다. T_{DS} 는 가뭄의 지속기간이 특정 값

Table 4.8 Return periods defined separately by drought duration and standardized drought severity

(a) Jucheon

Return period (years)	Drought duration (months)	Standardized drought severity
2	1.41	0.11
5	2.97	0.55
10	5.23	1.15
20	9.20	2.09
50	19.47	4.07
100	34.30	6.32

(b) Jeongseon 2

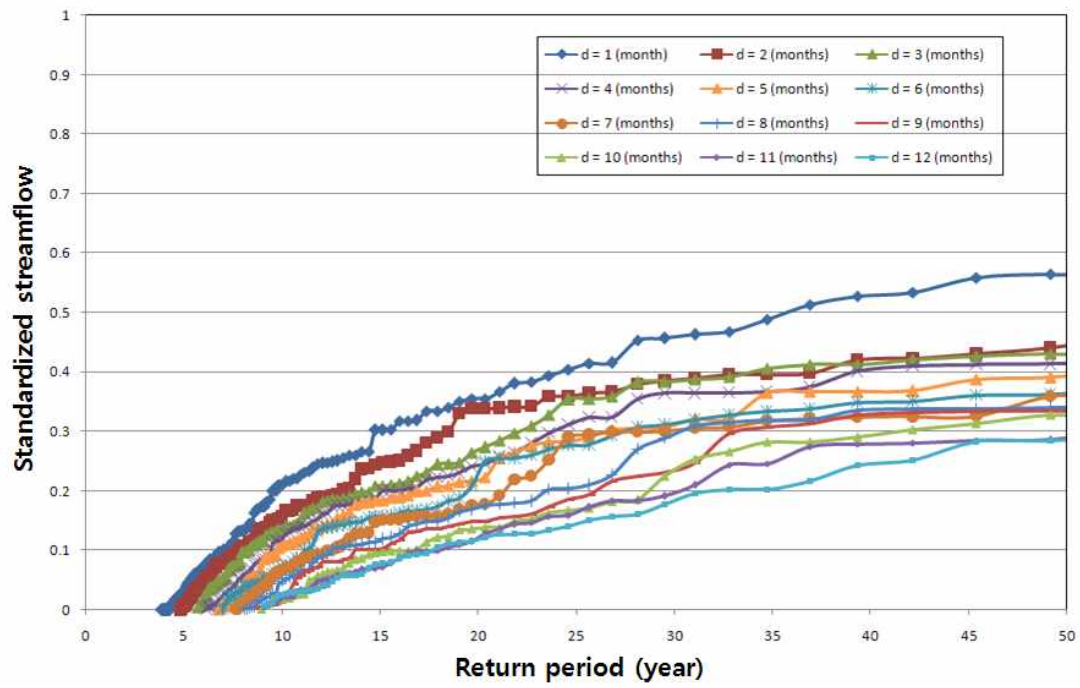
Return period (years)	Drought duration (months)	Standardized drought severity
2	1.59	0.22
5	4.20	0.96
10	7.13	1.91
20	11.47	3.30
50	20.71	6.05
100	31.93	9.03

(c) Pyeongchang

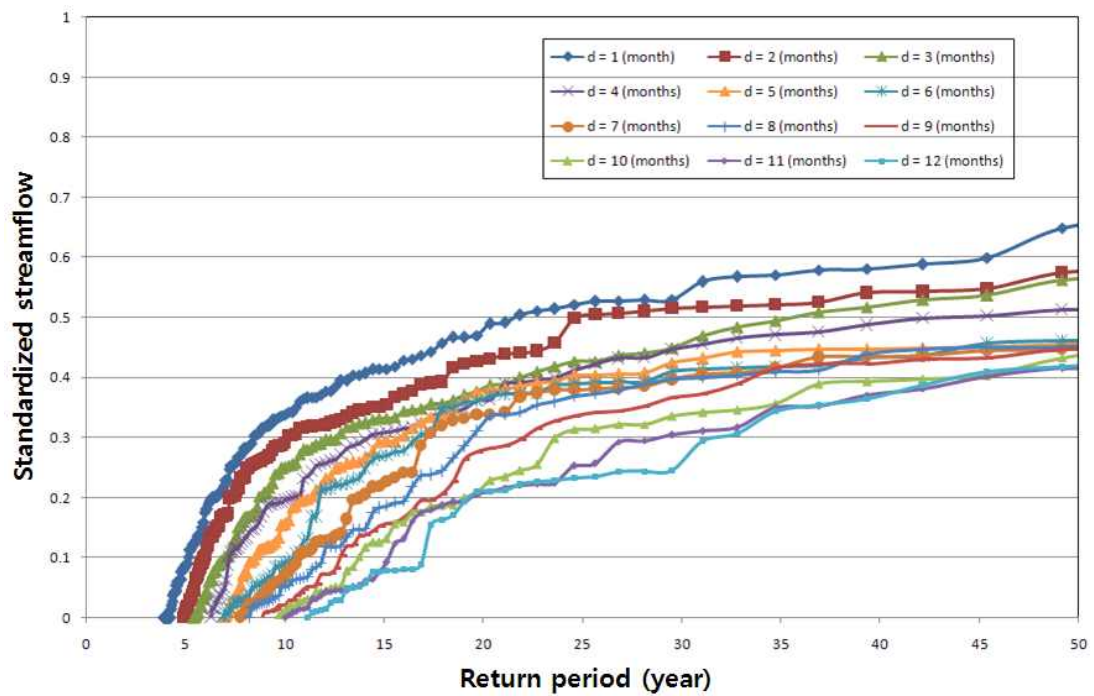
Return period (years)	Drought duration (months)	Standardized drought severity
2	1.60	0.26
5	4.24	1.28
10	6.93	2.66
20	10.65	4.76
50	18.01	9.03
100	26.34	13.77

(d) Yeongwol 1

Return period (years)	Drought duration (months)	Standardized drought severity
2	0.75	0.12
5	4.39	0.48
10	7.59	0.85
20	11.03	1.39
50	15.83	2.49
100	19.63	3.81

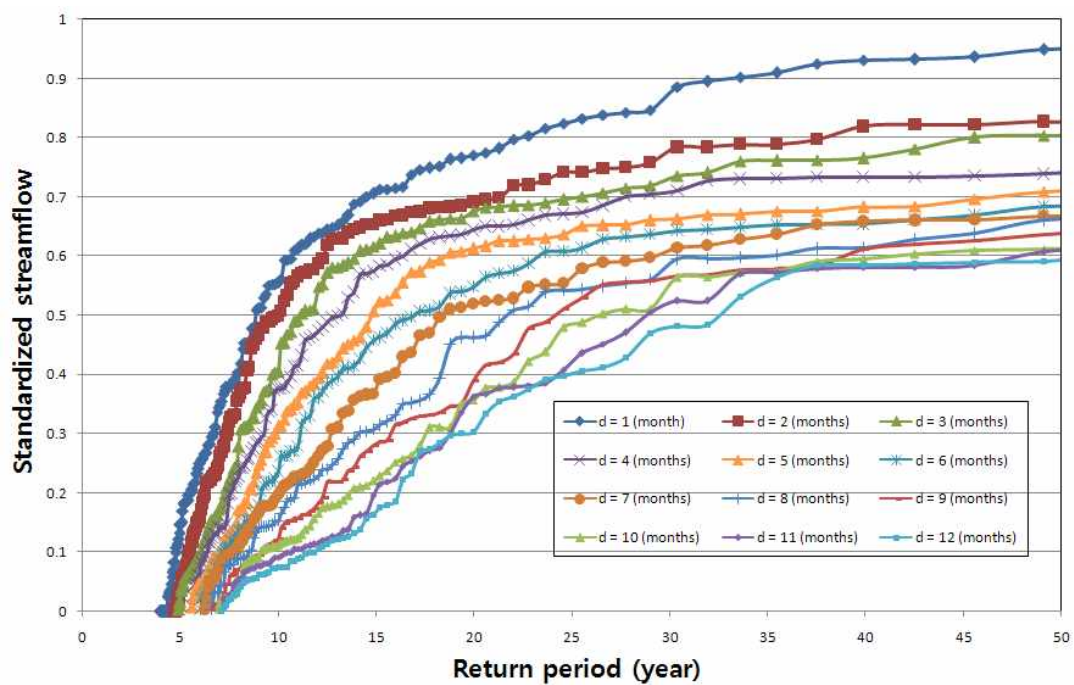


(a) Jucheon

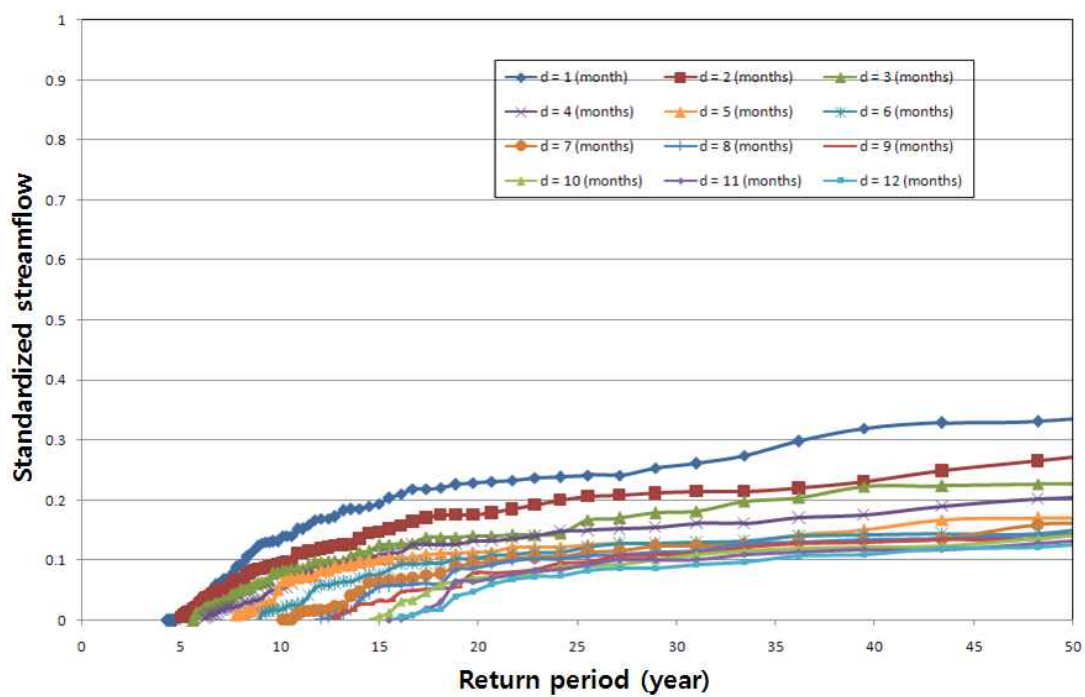


(b) Jeongseon 2

Figure 4.11 Low flow frequency curve of standardized streamflow

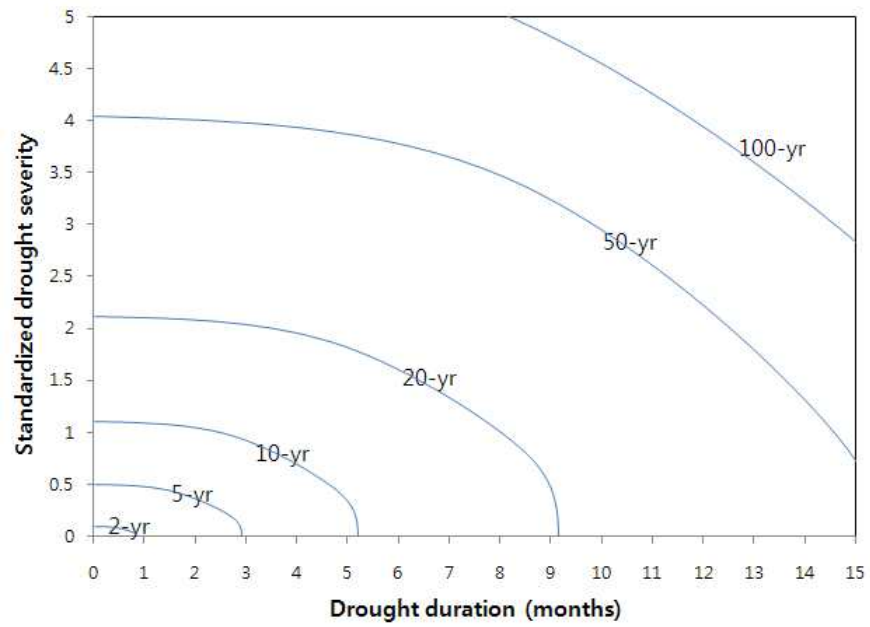


(c) Pyeongchang

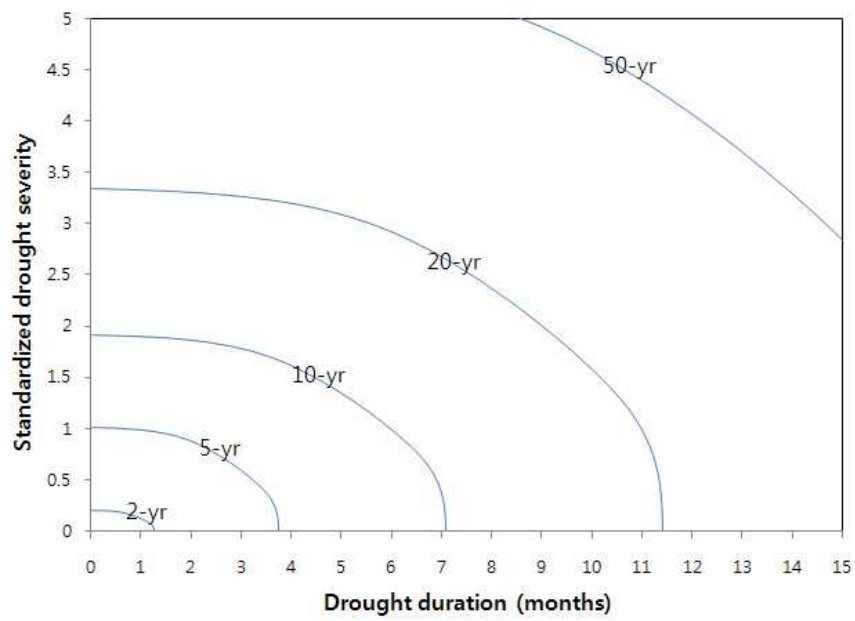


(d) Yeongwol 1

Figure 4.11 Low flow frequency curve of standardized streamflow (continued)

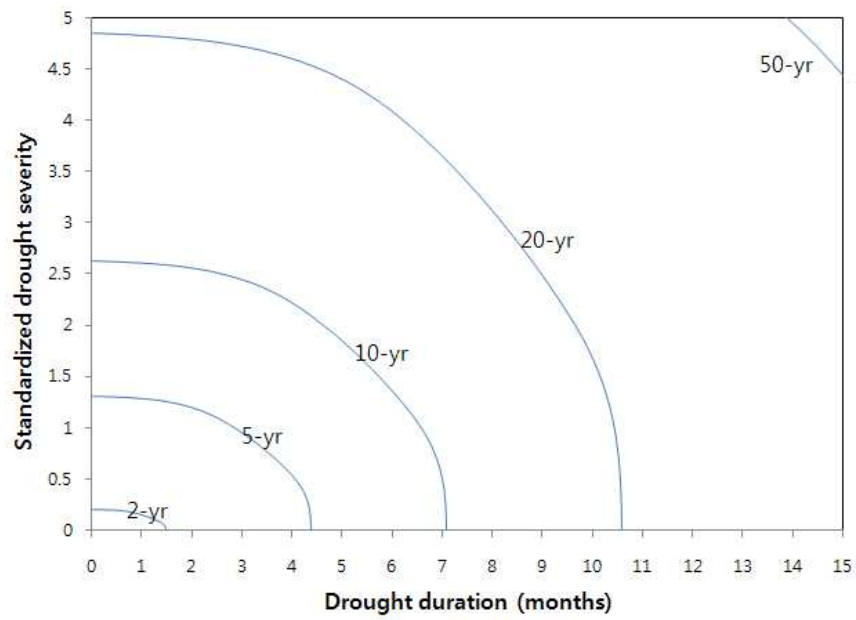


(a) Jucheon

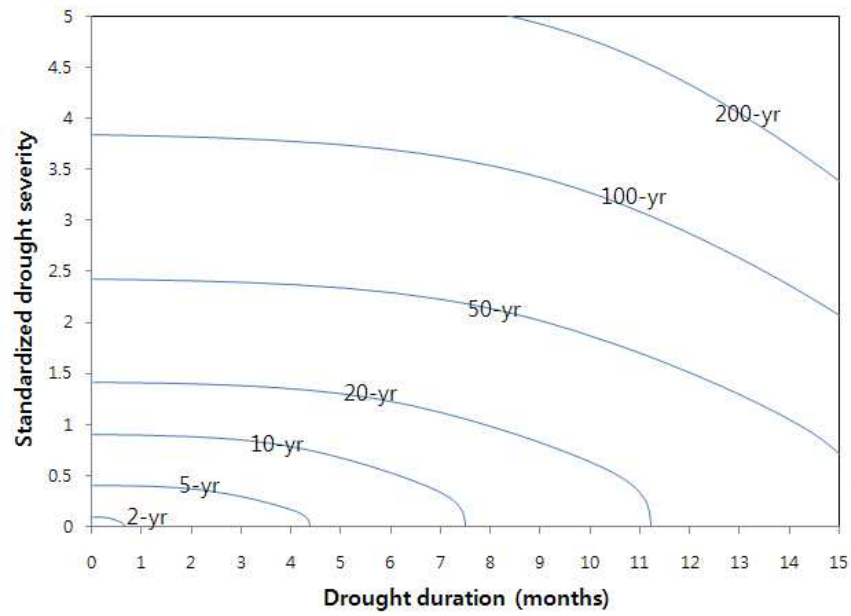


(b) Jeongseon 2

Figure 4.12 Return period of bivariate drought duration and standardized drought severity T_{DS}

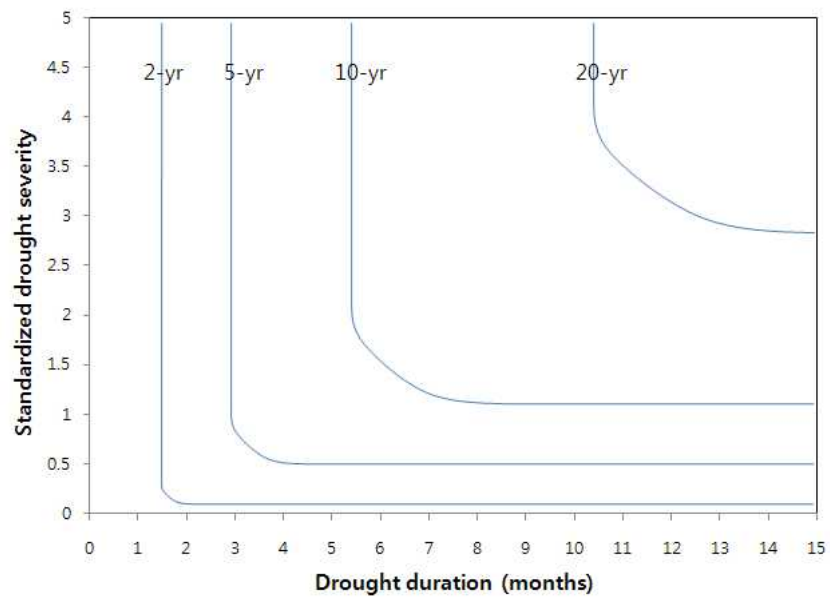


(c) Pyeongchang

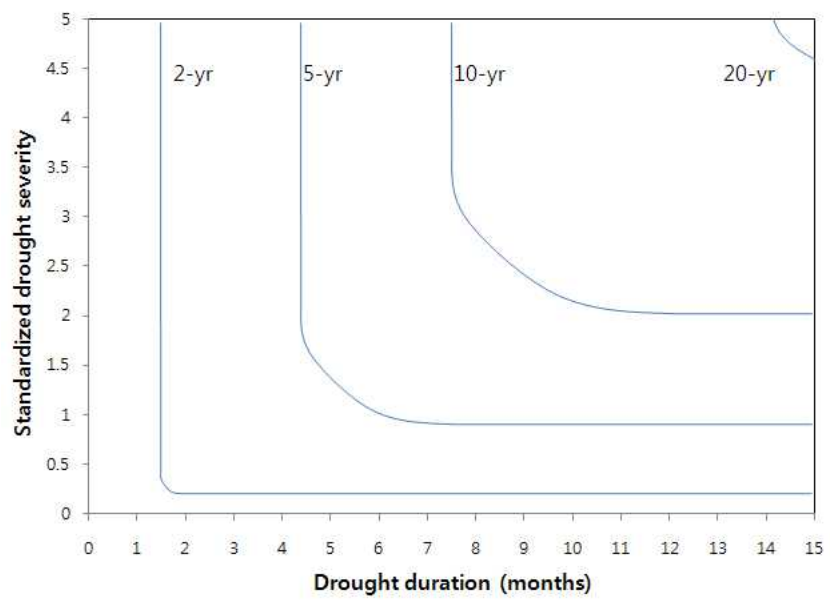


(d) Yeongwol 1

Figure 4.12 Return period of bivariate drought duration and standardized drought severity T_{DS} (continued)

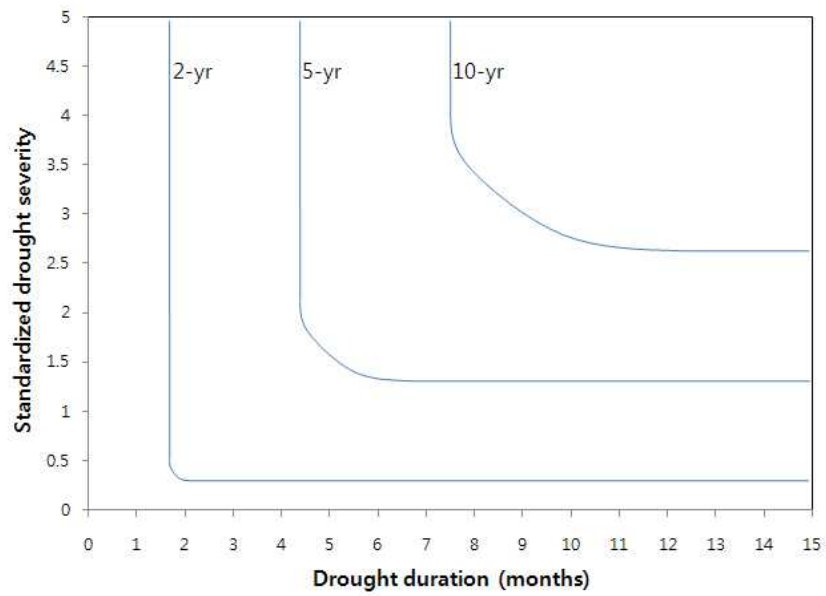


(a) Jucheon

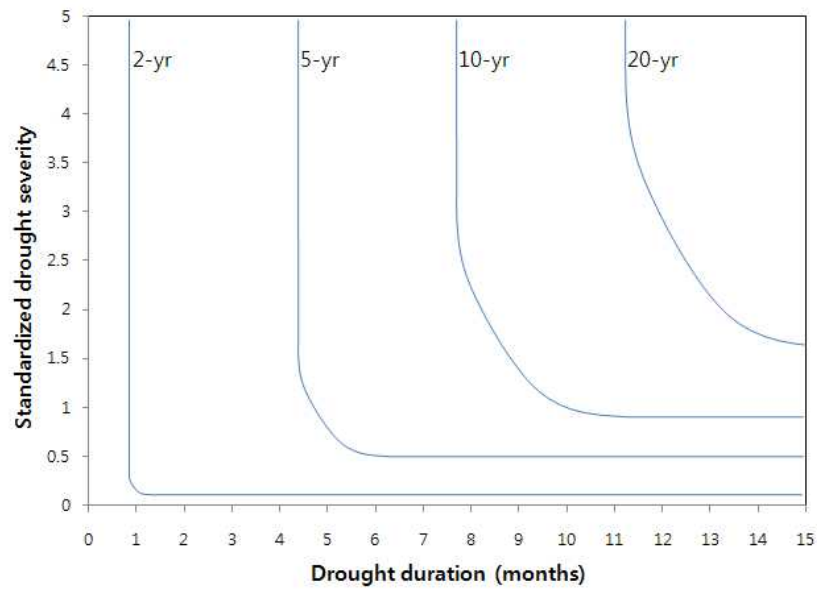


(b) Jeongseon 2

Figure 4.13 Return period bivariate drought duration and standardized drought severity T'_{DS}



(c) Pyeongchang



(d) Yeongwol 1

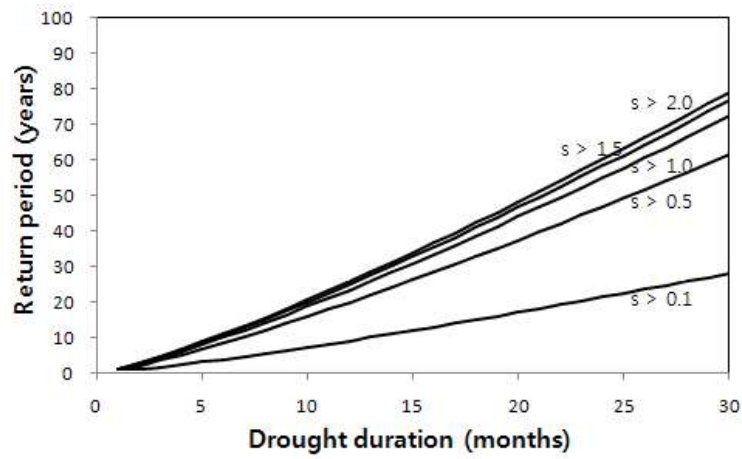
Figure 4.13 Return period bivariate drought duration and standardized drought severity T'_{DS} (continued)

을 초과하고 동시에 가뭄의 심도가 특정 값을 초과하였을 때 ($D > d$ and $S > s$), 가뭄 지속기간과 심도를 동시에 고려한 재현기간이다. T'_{DS} 는 가뭄의 지속기간이 특정 값을 초과하거나 가뭄의 심도가 특정 값을 초과하였을 때 ($D > d$ or $S > s$), 가뭄 지속기간과 심도를 동시에 고려한 재현기간이다. Figure 4.12와 Figure 4.13에서 확인할 수 있는 것처럼 다양한 조합의 가뭄 지속기간과 가뭄 심도에 같은 값의 재현기간이 나타나기도 한다. 그렇기 때문에 재현빈도가 같은 값끼리 이은 곡선을 표시하였다.

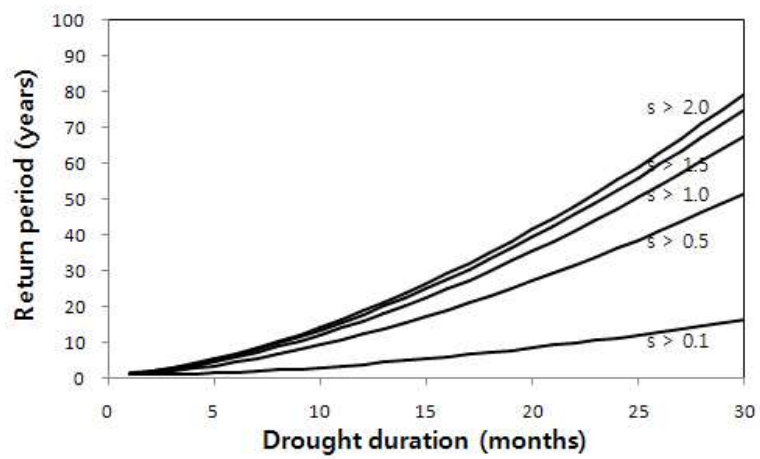
서로 다른 방법에 의해 구해진 곡선은 다른 양상을 보이고 있다. 주천의 경우를 예로 들면, 가뭄의 지속기간이 3개월을 초과하고 가뭄의 심도가 0.6을 초과하는 경우의 T_{DS} 는 6.20 years이며, T'_{DS} 는 4.55 years이다. T_{DS} 의 경우는 가뭄의 지속기간과 가뭄의 심도에 대해 각각 구한 재현기간인 T_D 와 T_S 보다 길며, T'_{DS} 의 경우는 T_D 와 T_S 보다 값이 짧다.

Figure 4.14와 Figure 4.15는 식(2.86)과 식(2.87)을 이용하여 구한 가뭄 지속기간과 심도의 조건부 재현기간으로, 각각 가뭄 심도가 s 보다 큰 경우의 가뭄 지속기간에 대한 조건부 재현기간과 가뭄 지속기간이 d 보다 긴 경우의 가뭄 심도에 대한 조건부 재현기간이다.

Table C (Appendix)에서는 지금까지 계산한 가뭄의 재현기간인 가뭄 지속기간에 대한 재현기간(T_D), 가뭄 심도에 대한 재현기간(T_S), 가뭄 지속기간이 특정값을 초과하고 동시에 가뭄 심도가 특정값을 초과하였을 때 ($D > d$ and $S > s$)의 재현기간(T_{DS}), 가뭄 지속기간이 특정값을 초과하거나 가뭄의 심도가 특정값을 초과하였을 때 ($D > d$ or $S > s$)의 재현기간(T'_{DS}), 가뭄 심도가 특정값 s 보다 큰 경우의 가뭄 지속기간에 대한 조건부 재현기간($T_{D|S>s}$), 가뭄 지속기간이 특정값 d 보다 긴 경우의 가뭄 심도에 대한 조건부 재현기간($T_{S|D>d}$), 그리고 저수량 빈

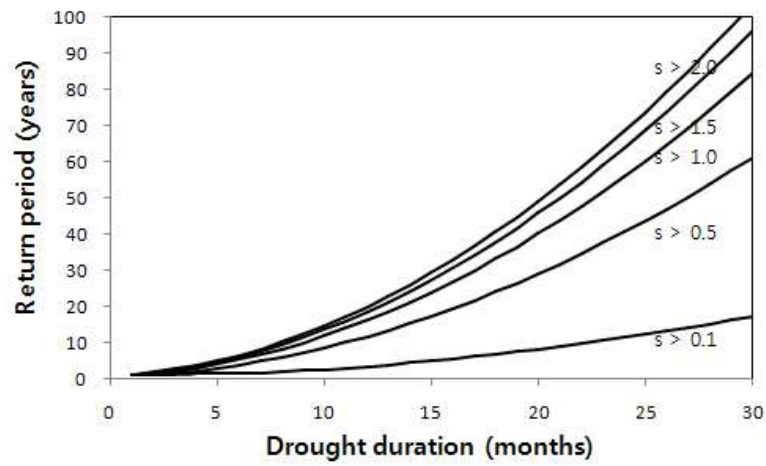


(a) Jucheon

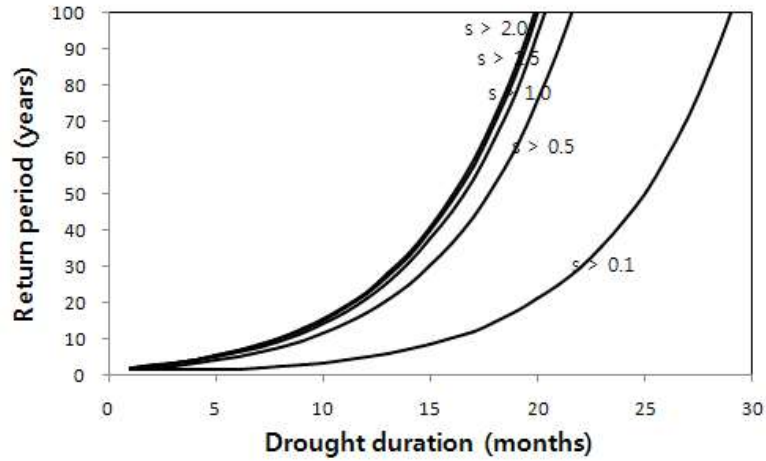


(b) Jeongseon 2

Figure 4.14 Conditional return period of drought duration given standardized drought severity exceeding various values

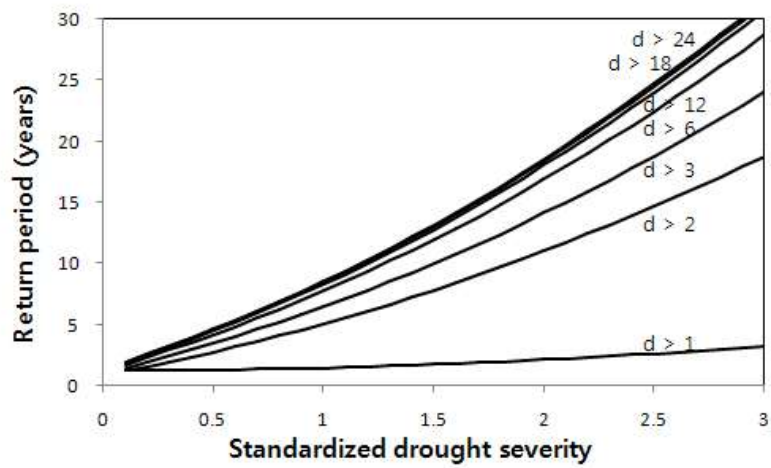


(c) Pyeongchang

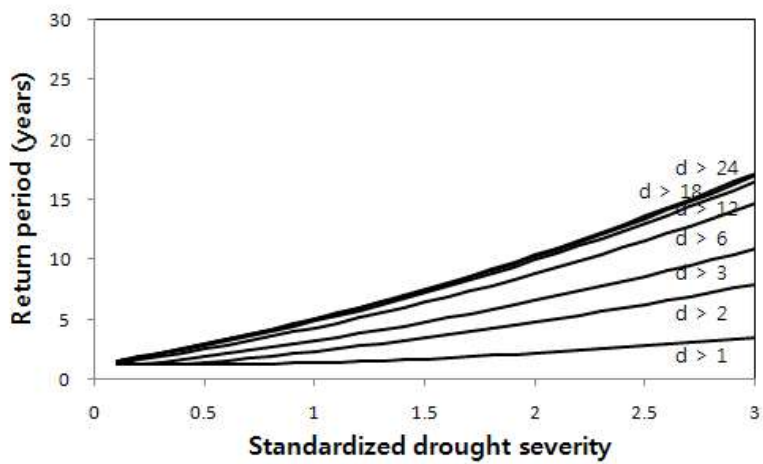


(d) Yeongwol 1

Figure 4.14 Conditional return period of drought duration given standardized drought severity exceeding various values (continued)

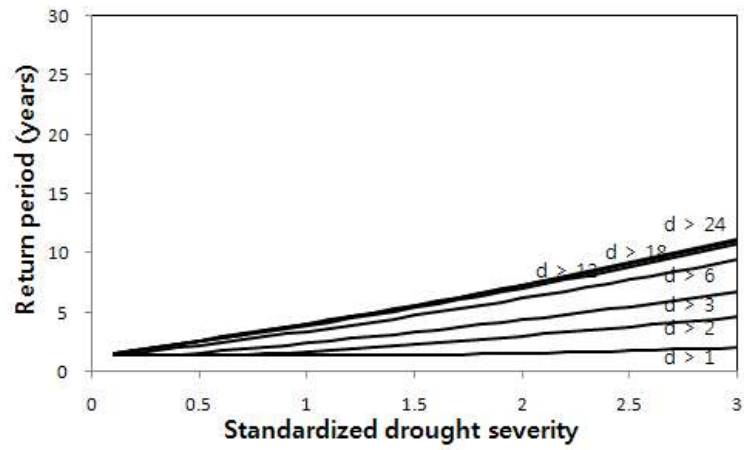


a) Jucheon

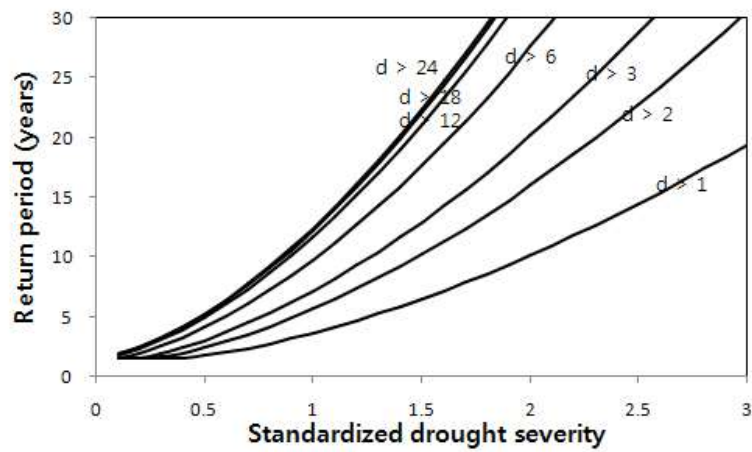


(b) Jeongseon 2

Figure 4.15 Conditional return period of standardized drought severity given drought duration exceeding various values



(c) Pyeongchang



(d) Yeongwol 1

Figure 4.15 Conditional return period of standardized drought severity given drought duration exceeding various values (continued)

도분석에 의해서 구한 재현기간(T_L)을 각각 가뭄의 심도가 0.1부터 1.0 일 때를 비교해 보았다.

전반적으로 T_{DS} 는 가뭄 지속기간이 길어질수록 점점 큰 재현기간을 보이며 T_S 보다 긴 재현기간을 갖는다. T'_{DS} 는 T_S 보다 짧은 재현기간을 보이며, 가뭄 지속기간이 길어질수록 점점 T_S 에 가까운 재현기간을 보인다. 조건부 재현기간인 $T_{D|S>s}$ 와 $T_{S|D>d}$ 는 T_{DS} 보다 긴 재현기간을 보인다.

저수량 빈도분석을 통해 계산된 T_L 은 지속기간을 매개변수로 하여 재현기간과 가뭄의 강도의 관계를 보여주며, copula를 이용한 결합누가 분포함수에 의해 구한 가뭄의 재현기간은 지속기간을 확률변수로 하며, 다양한 조건에 재현기간이 계산되는 것을 볼 수 있다.

4.5 본 연구와 실제 가뭄의 비교

Figure 4.16을 보면 주천, 정선2, 평창, 그리고 영월1 지점의 가뭄사상을 한 눈에 비교하고 확인할 수 있다. 3.1절에서 언급한 실제 가뭄 피해와 비교하면, 평창에서만 1993년부터 1995년까지 심한 가뭄사상이 발생한 것을 확인할 수 있으며, 정선2에서는 1992년과 1994년에 가뭄사상이 발생한 것을 확인할 수 있었다. 2000년대 초반의 가뭄사상은 영월1, 평창, 그리고 정선2 지역의 가뭄사상을 통해 확인할 수 있다. 본 연구에서 주천, 정선2, 평창, 그리고 영월1 지점에서 동일하게 발생한 가뭄사상은 2008년부터 시작한 가뭄으로 각각의 지점에서 강도가 0.1 ~ 0.5 정도로 확인되었다. 4개 지점에서 가뭄 사상이 겹치는 구간의 지속기간은 12 개월이며, 강도는 주천, 정선2, 평창, 그리고 영월1에서 각각 0.220, 0.312, 0.423, 그리고 0.124이다. 4개 지점에서의 평균 강도는 0.270이며 심도는 3.24이다.

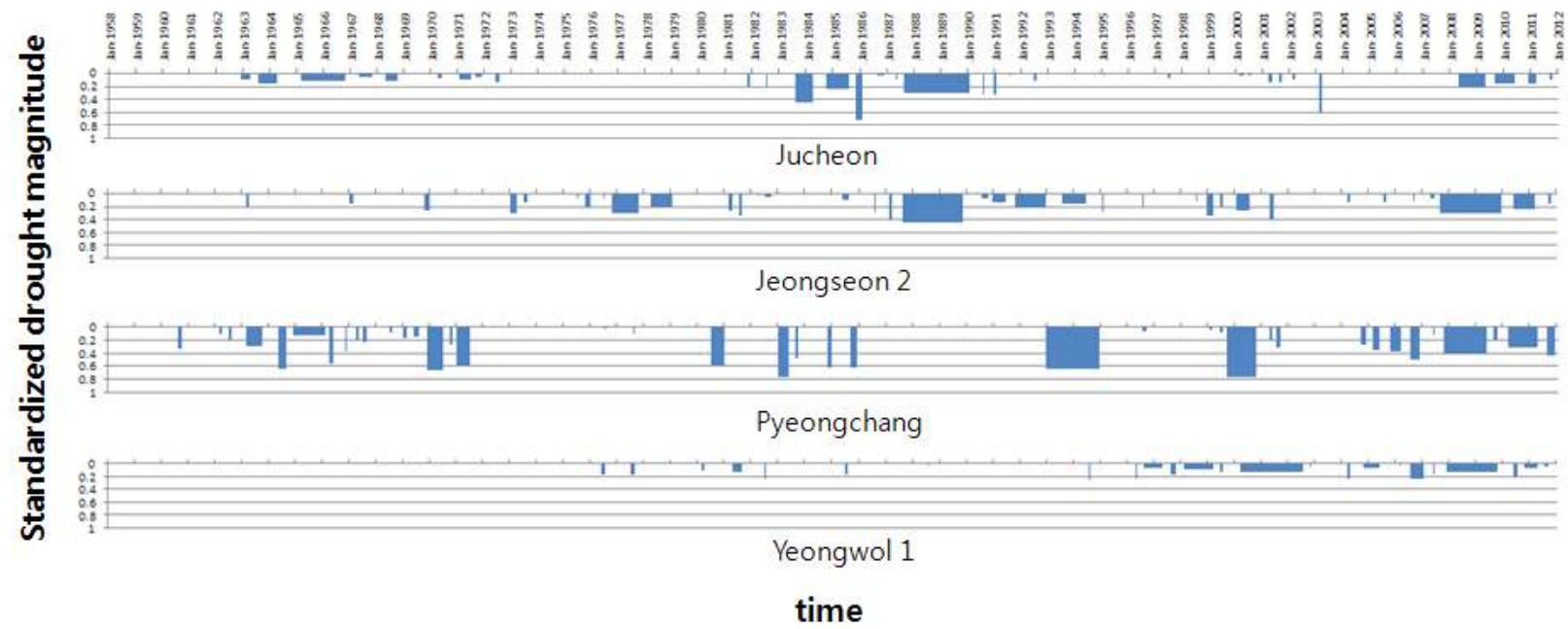


Figure 4.16 Comparison of the drought events of the studied sites

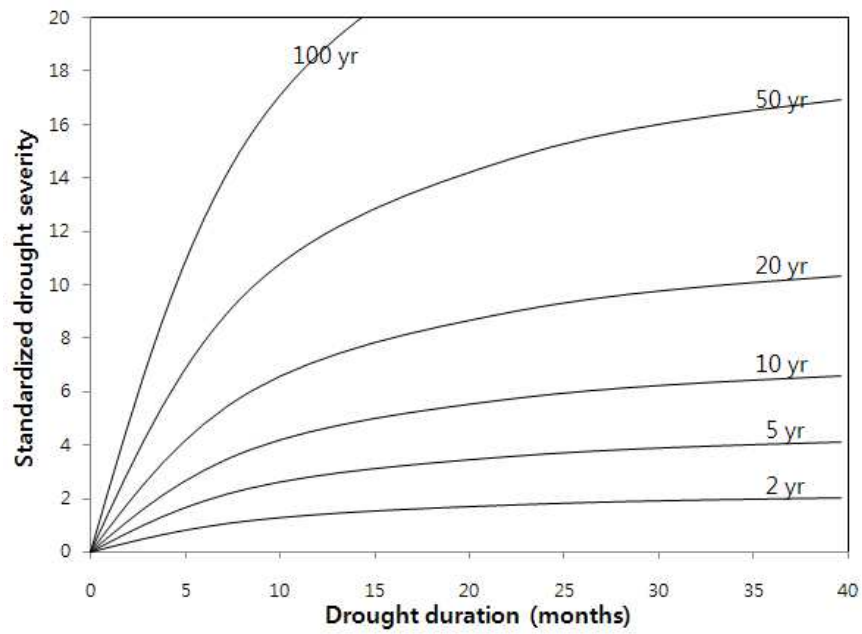
가뭄의 지속기간 12 개월과 가뭄의 심도 3.24를 갖는 가뭄사상을 이용하여 본 연구에서 각각 계산한 가뭄의 재현기간에 적용하면 Table 4.9를 얻을 수 있다. 영월1과 주천의 경우는 심도에 영향을 많이 받는 것을 알수 있었으며, 특히 영월1 지점의 결과를 보면 다른 지점에 비해서 지속기간과 심도가 함께 고려되었을 때 가뭄의 재현기간이 길게 나오는 것을 확인할 수 있다. 영월 1 지점의 심도(혹은 강도)가 타 지점에 비해 상대적으로 적은 것이 하나의 이유일 것이며, 유량을 표준화 시켰을 때 유량의 최대값과 최소값의 차이가 크지 않기 때문일 것이다. 반대로 정선2와 평창 지점은 심도보다 지속기간에 영향을 많이 받는 지점으로 판단된다. 2008년에 발생한 가뭄은 T_{DS} 로 보았을 때 대략 약 70년 빈도의 가뭄으로 판단되고, T'_{DS} 로 보았을 때는 10 ~ 20년 빈도의 가뭄으로 판단된다. $T_{D|S>s}$ 와 $T_{S|D>d}$ 의 값은 20 ~ 30년의 재현기간을 보이며, T_L 도 각각 20 ~ 50년의 재현기간을 보인다. 이 값을 통해 2008년의 가뭄사상이 해당 지점에 큰 영향을 미쳤을 것으로 판단된다. 실제로 2008년에 본 연구 지점은 아니지만 같은 강원도 내에 있는 태백 지역에 심한 가뭄이 있었음을 확인하였으며, 가뭄이 한 지점에서 발생하지 않고 광범위하게 영향을 미친다는 점에서 어느 정도 결과에 타당성이 있다고 판단한다.

4.6 SDF (Severity-Duration-Frequency) 곡선

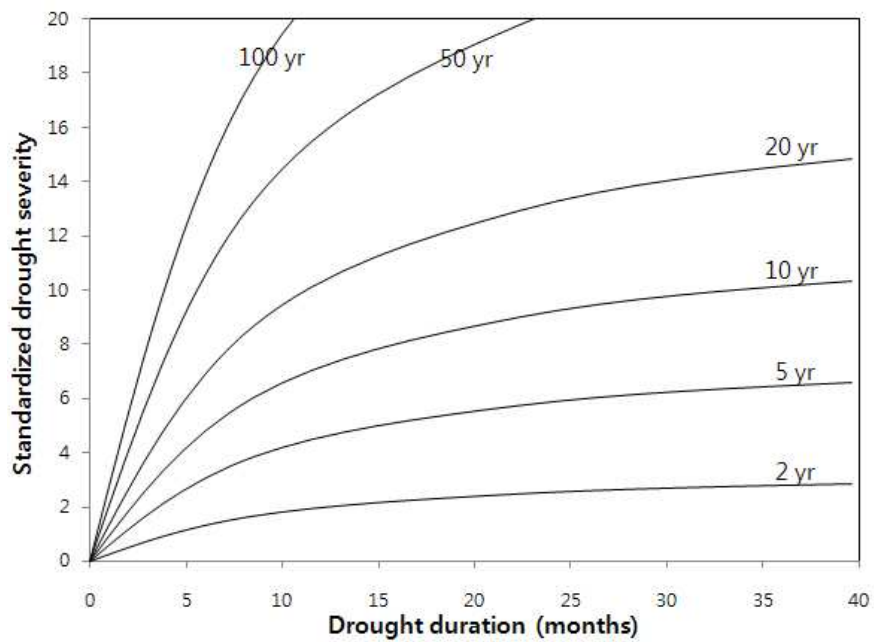
각 지점에서의 가뭄의 심도와 지속기간 그리고 재현기간에 대해 곡선을 그릴수 있다. 가뭄사상의 평균 발생주기인 $E(L)$ 와 식(2.90)를 이용하

Table 4.9 Return periods of the historical drought event which occurred in 2008

Site	Duration d (month)	Severity s	T_D (year)	T_S (year)	T_{DS} (year)	T'_{DS} (year)	$T_{D S=s}$ (year)	$T_{S D=d}$ (year)	T_L (year)
Jucheon	12	3.24	27.67	35.91	81.82	19.32	26.68	34.24	21.41
Jeongseon 2			21.43	19.54	38.23	13.95	21.53	18.36	36.15
Pyeongchang			24.50	12.46	28.82	11.58	26.23	11.76	27.31
Yeongwol 1			24.18	76.52	129.77	21.40	24.62	72.50	48.86

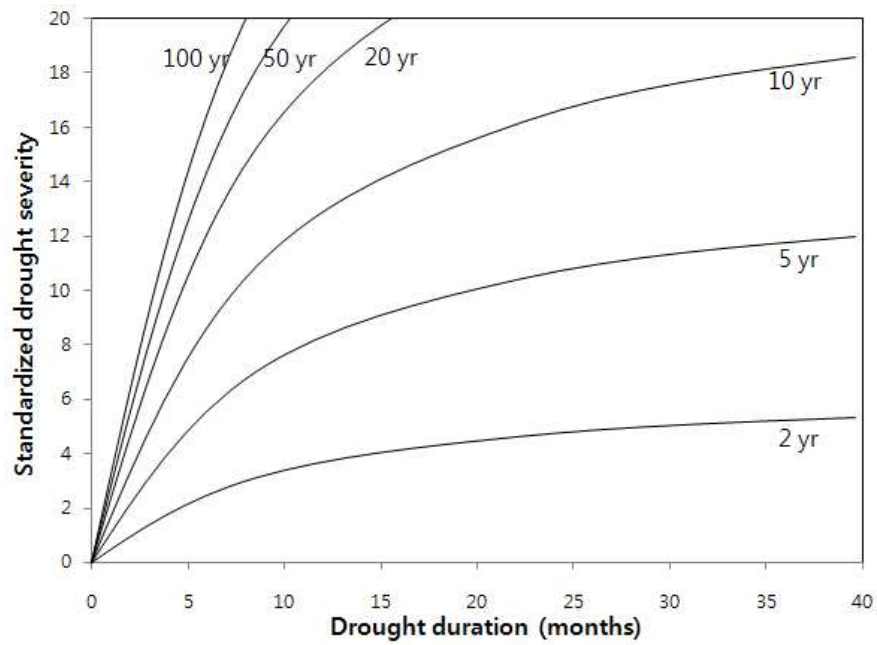


(a) Jucheon

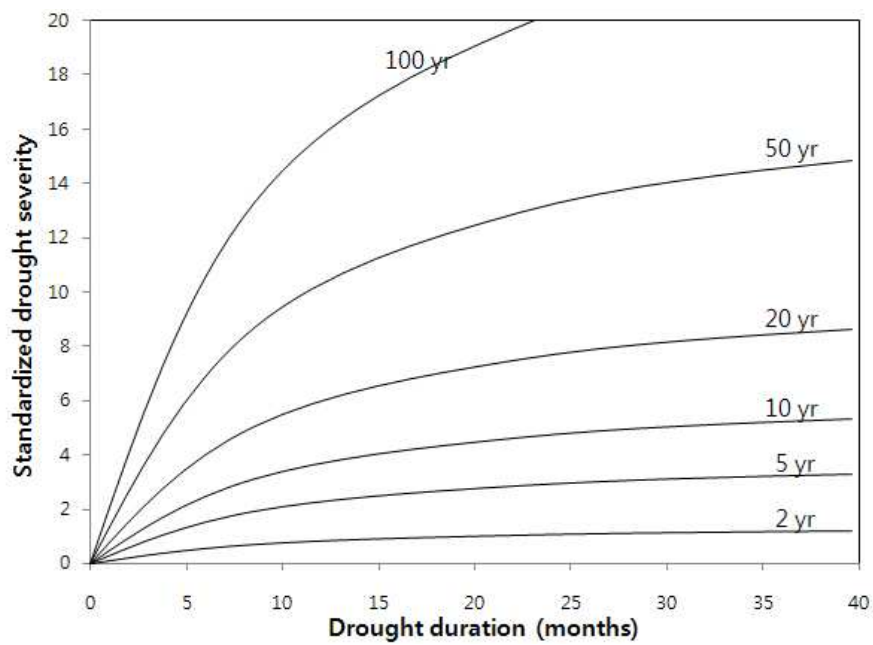


(b) Jeongseon 2

Figure 4.16 Drought SDF (Severity–Duration–Frequency) curves



(c) Pyeonchang



(d) Yeongwol 1

Figure 4.16 Drought SDF (Severity–Duration–Frequency) curves (continued)

면 주천(a), 정선2(b), 평창(c), 그리고 영월1(d)에서의 SDF 곡선식(4.6)을 구할수 있다. Figure 4.17은 각 지점에서의 SDF 곡선이다.

$$T_{S|D}(s|d) = \frac{15.472}{1 - \left[1 + F_D(d)^{-13.5704} (F_S(s)^{-13.5704} - 1)^{-\frac{1}{13.5704} - 1} \right]} \quad (4.6a)$$

$$T_{S|D}(s|d) = \frac{16.212}{1 - \left[1 + F_D(d)^{-15.4113} (F_S(s)^{-15.4113} - 1)^{-\frac{1}{15.4113} - 1} \right]} \quad (4.6b)$$

$$T_{S|D}(s|d) = \frac{16.615}{1 - \left[1 + F_D(d)^{-19.8668} (F_S(s)^{-19.8668} - 1)^{-\frac{1}{19.8668} - 1} \right]} \quad (4.6c)$$

$$T_{S|D}(s|d) = \frac{18.499}{1 - \left[1 + F_D(d)^{-13.8558} (F_S(s)^{-13.8558} - 1)^{-\frac{1}{13.8558} - 1} \right]} \quad (4.6d)$$

여기서 $F_D(d)$ 와 $F_S(s)$ 는 식(4.1 ~ 4.4)에 해당하며, 각 지역에서의 가뭄 지속기간과 심도에 대한 주변 누가분포함수이다.

주천과 영월1의 SDF 곡선은 다른 지점에 비해 비교적 완만한 곡선 형태를 보이며, 정선2와 평창은 비교적 가파른 곡선의 형태를 보인다. 동일한 재현기간에서 보면 주천과 영월1에 비해 정선2와 평창은 심도가 큰 가뭄의 영향을 받는 것을 알 수 있다.

5. 결론 및 향후 과제

5.1 결론

본 연구에서는 수문학적 가뭄을 대상으로 남한강 상류 유역의 4개 지점에서 유량 자료에 대해 copula를 이용하여 이변량 가뭄 빈도분석을 수행하였다. 하천가뭄의 빈도분석을 위해 총 5단계의 과정으로 진행되었으며, 그 중 첫 번째 단계는 자료의 표준화와 절단수준법을 이용하여 유량자료에 대하여 수문학적 가뭄사상을 정의하였고, 두 번째 단계는 가뭄의 지속기간과 가뭄의 심도에 대해 적합한 확률분포형을 선정하였고, 세 번째 단계에서는 copula의 선정과 매개변수 추정하였고, 네 번째 단계에서는 가뭄의 재현기간을 일변량 빈도분석, 저수량 빈도분석, 그리고 copula를 이용한 이변량 빈도분석을 통해 계산하였고, 마지막으로 copula를 이용하여 SDF 곡선을 구하였다.

주천, 정선2, 평창, 그리고 영월1 지점만 보면 Pareto, lognormal, GEV, 그리고 Weibull 분포가 지속기간과 심도에 대해 각각 선정이 되었는데, 총 4개 지점에서 선택된 확률분포형을 종합하면 동일한 유역내에 위치한 지점에서 빈도분석을 수행할 경우 지속기간에 대해서는 GEV 분포를 이용하고, 심도에 대해서는 lognormal 분포를 이용하는 것이 적절할 것으로 판단한다.

일변량 빈도분석을 통해 얻는 재현기간은 copula를 이용하여 지속기간과 심도를 동시에 고려할 때 구한 재현기간과 비교하였을 때, T_D 는 지속기간이 길어질수록, T_S 는 심도가 커질수록 T_{DS} 에 가까운 값을 갖는다. 저수량 빈도분석의 재현기간 T_L 과 copula를 이용한 빈도분석의 재현기간 $T_{S|D>d}$ 를 비교하면, 심도가 작은 경우 T_L 이 $T_{S|D>d}$ 보다 긴 재현기간을 보이며, 심도가

커질수록 서로 비슷한 값을 보인다. T_L 과 T_{DS} 를 비교해 보면, 주천과 영월1 지점은 지속기간이 4 ~ 6개월 일 때 비슷한 결과를 보이며, 지속기간에 다른 구간에서는 재현기간에 차이가 난다. 정선2와 평창 지점은 지속기간이 7 ~ 9개월일 때 비슷한 재현기간을 보인다. T_L 과 $T_{S|D>d}$ 의 차이는 가뭄의 지속기간이 저수량 빈도곡선에서는 매개변수로 고려되고, copula를 이용한 빈도분석에서는 지속기간이 확률변수로 고려되는 차이에서 나타나는 결과로 판단되며, 서로 다른 구간의 지속기간에서 재현기간이 비슷한 결과를 보이는 것은 각 지점의 유량자료와 표준화된 가뭄심도의 평균과 표준편차의 차이에 근거하는 것으로 판단된다.

주천, 정선2, 평창, 그리고 영월1 지점에 대해 가뭄사상을 정의하고 실제 가뭄과 비교한 결과, 1990년대 중반과 2000년대 초반의 가뭄 피해에 대한 가뭄은 본 연구를 통해서 잘 나타나지 않았다. 그러나 4개 지점에서 12개월 동안 가뭄사상이 겹치는 가뭄이 2008년에 있었으며, 실제 2008년에 태백지역에 심한 가뭄이 있었던 것으로 확인되었고, copula를 이용하여 지속기간과 심도를 동시에 고려하여 빈도분석을 한 결과 약 70년의 재현기간을 갖는다.

Copula를 이용한 SDF 곡선은 가뭄의 재현기간을 일변량 빈도분석과 저수량 빈도분석과 비교했을 때, 더 과학적인 방법으로 계산할 수 있게 해주며, 지속기간과 심도 그리고 재현기간에 대한 정보를 한눈에 보여주기 때문에 수공구조물의 설계, 하천유지유량의 유지, 수자원 계획 등에서 이용할 수 있을 것이다.

5.2 향후 과제

본 연구에서는 가뭄의 빈도분석 방법 중에서 일변량 빈도분석과 저수

량 빈도분석과 copula를 이용한 이변량 빈도분석을 수행하여 결과를 다뤘다. 향후 연구로 Copula를 이용하지 않는 이변량 빈도분석 방법과 삼변량 혹은 그 이상의 변량을 다루는 다변량 빈도분석을 할 수 있다.

Copula의 선정시 본 연구에서는 총 5개의 copula 중에서 하나의 copula를 선택하였다. 그러나 copula의 종류는 본 연구에서 이용한 copula가 전부가 아니다. 본 연구에서 이용하지 않은 copula 중에서 더 좋은 결과를 갖는 copula가 있을 수 있기 때문에 다른 종류의 copula의 적합도 검정을 해야한다.

유량을 이용하여 가뭄의 특성인 지속기간과 심도에 대해 이변량 빈도분석을 수행하고 SDF 곡선을 구하였는데, 강우의 경우 IDF 곡선이 있다. 두 곡선은 각각 심도/강도와 지속기간 그리고 빈도를 보여준다. 가뭄의 특성 중 심도(S)는 지속기간(D)와 강도(M)의 곱으로 계산할 수 있는데(식 2.1), SDF 곡선만 구할 것이 아니라 MDF 곡선을 구해볼 필요가 있다.

Copula의 적용과 관련해서는 현재 국내 그리고 해외에서 많은 연구가 진행되고 있으며, copula의 선정과 copula 매개변수 추정에 대한 방법론이 다양하게 제안되었고, 앞으로는 어느 수문자료를 이용하여도 적용가능하며 최적의 copula를 선정하고 매개변수를 추정하는 copula 모형이 등장할 것을 예상한다. 본 연구는 아직 copula 모형이라고 하기에는 미흡하지만, 현재 국내에 발표된 copula에 관련한 연구와 비교하여 향후연구가 가능하다. 또한, 가뭄의 정의, 자료의 표준화, threshold level의 선정, 가뭄의 지속기간과 심도의 확률분포형 결정, 그리고 copula의 선정과 매개변수 추정의 과정에서 나타나는 미세한 오류를 줄이는 방법에 대한 연구가 있으면 본 연구에 더욱 신뢰도 높은 결과를 보일 수 있다.

Appendix

Appendix A. Figures of monthly streamflow data

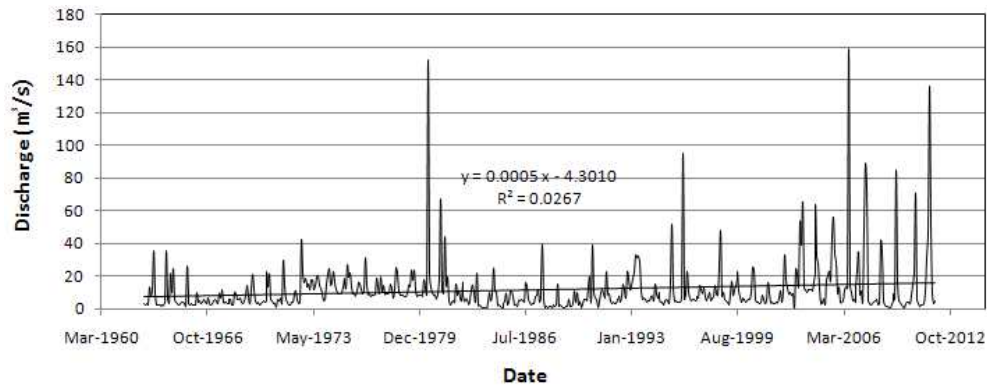


Figure A.1 Monthly streamflow of Jucheon

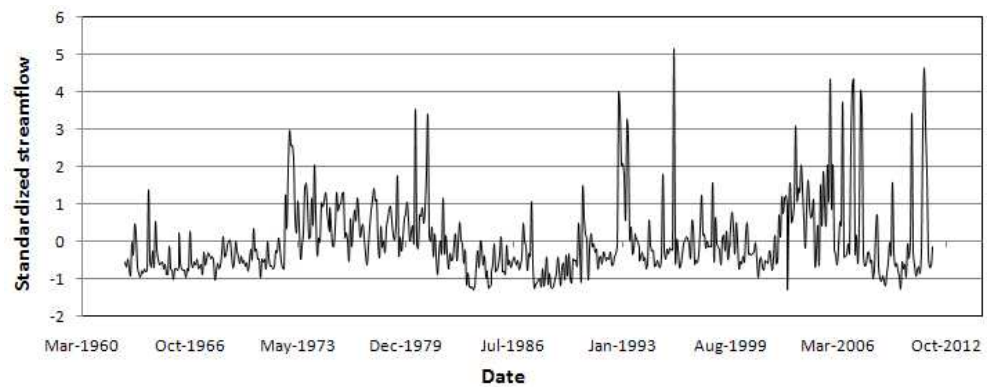


Figure A.2 Standardized monthly streamflow of Jucheon

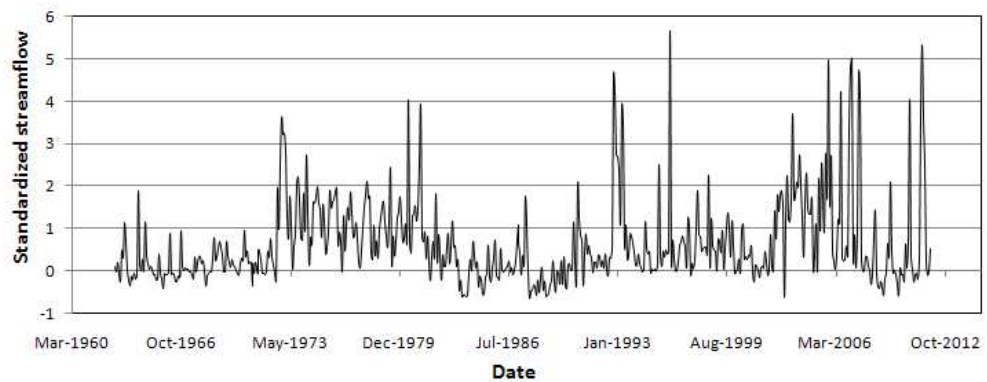


Figure A.3 Reconstructed standardized monthly streamflow by threshold level method of Jucheon

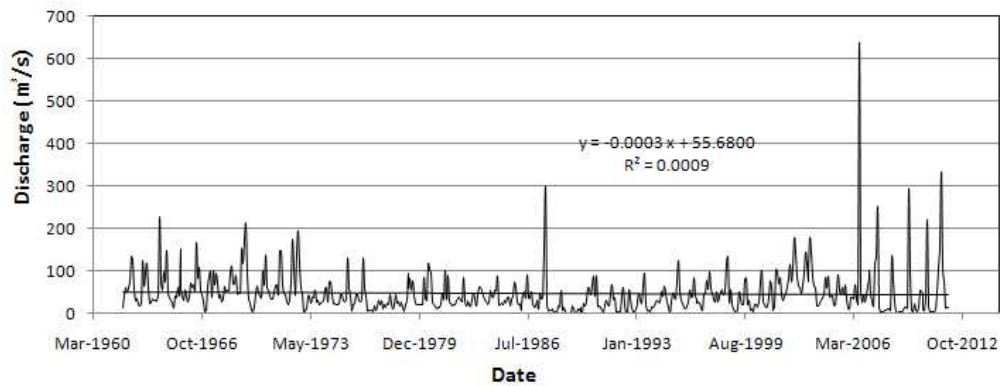


Figure A.4 Monthly streamflow of Jeongseon 2

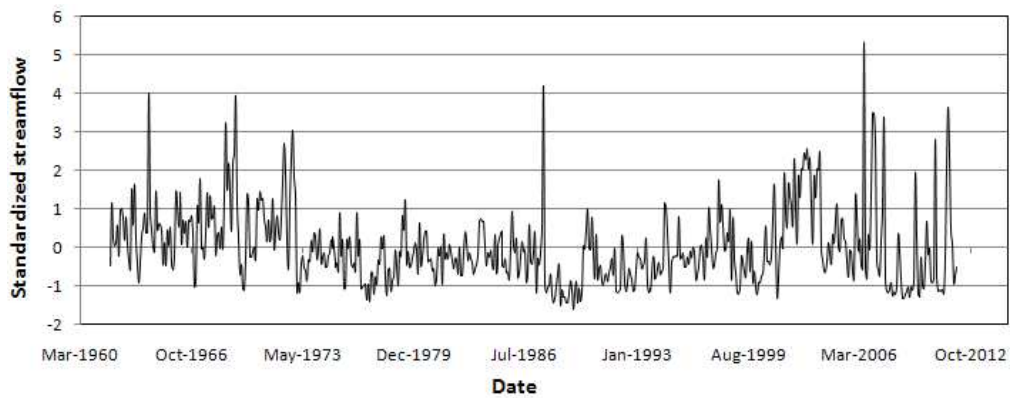


Figure A.5 Standardized monthly streamflow of Jeongseon 2

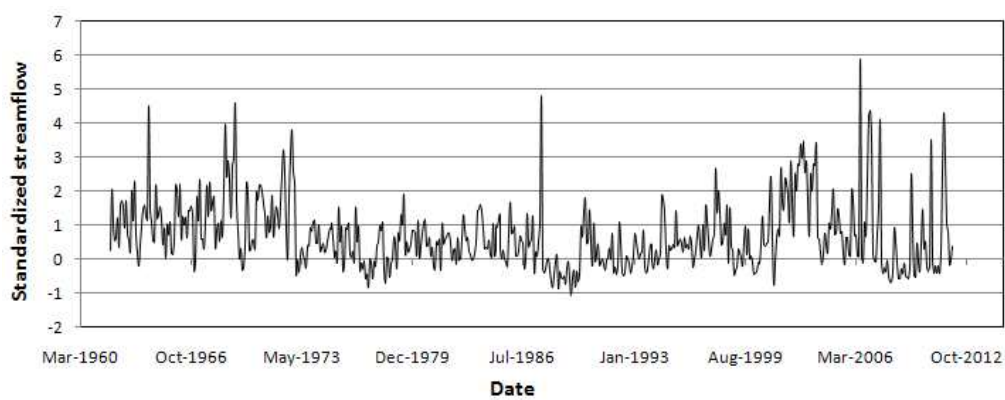


Figure A.6 Reconstructed standardized monthly streamflow by threshold level method of Jeongseon 2

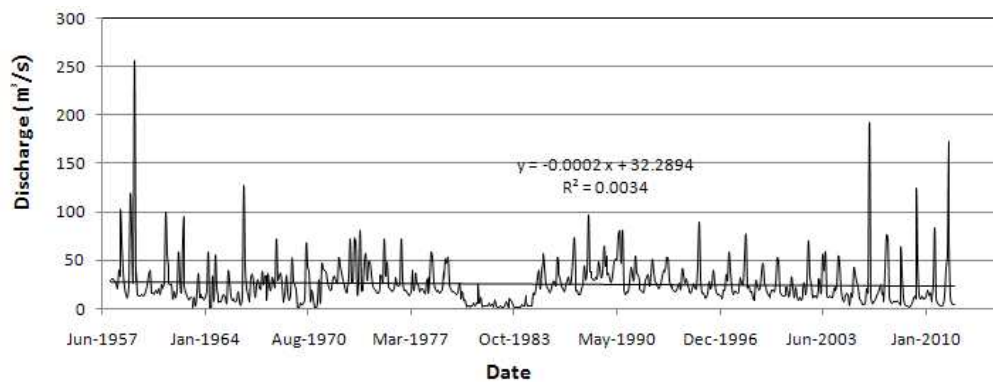


Figure A.7 Monthly streamflow of Pyeongchang

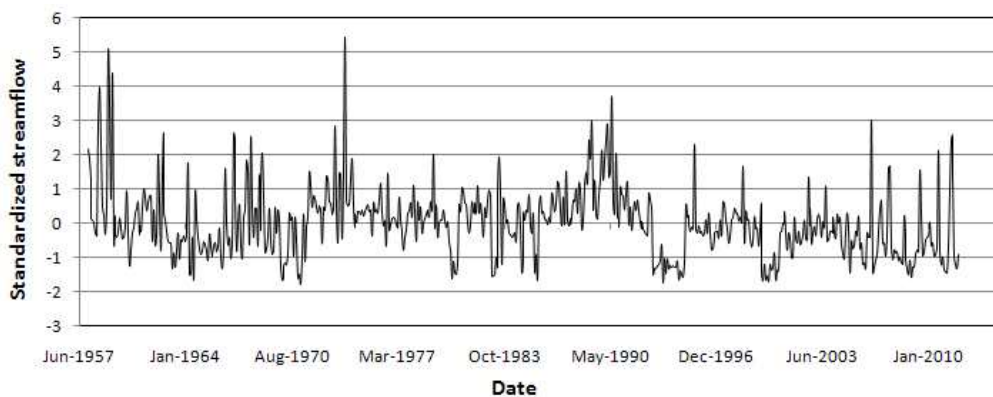


Figure A.8 Standardized monthly streamflow of Pyeongchang

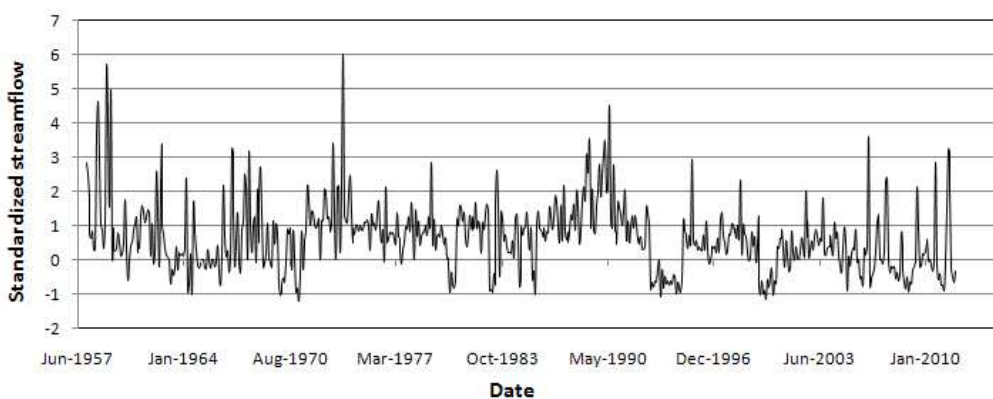


Figure A.9 Reconstructed standardized monthly streamflow by threshold level method of Pyeongchang

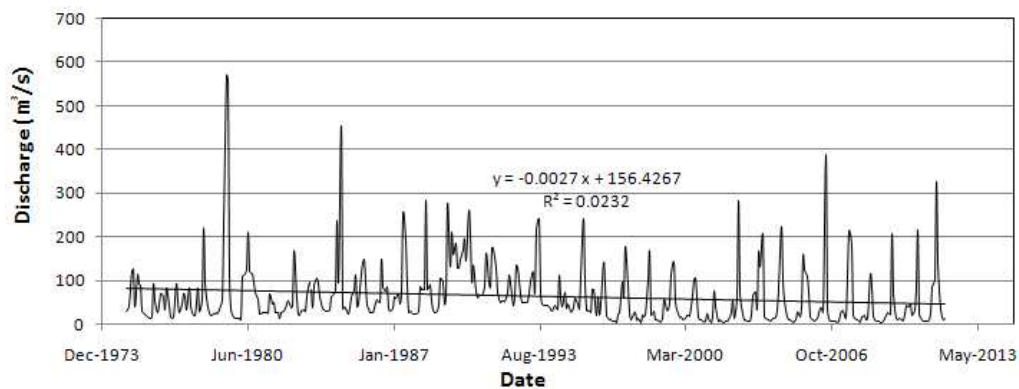


Figure A.10 Monthly streamflow of Yeongwol 1

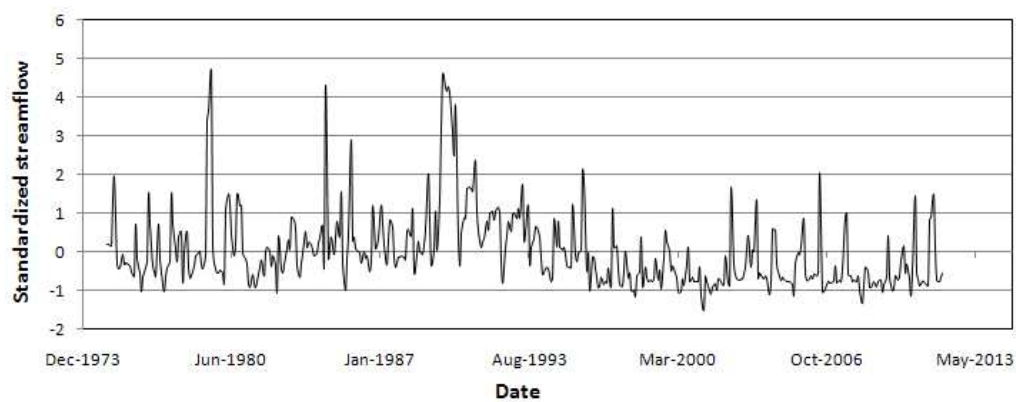


Figure A.11 Standardized monthly streamflow of Yeongwol 1

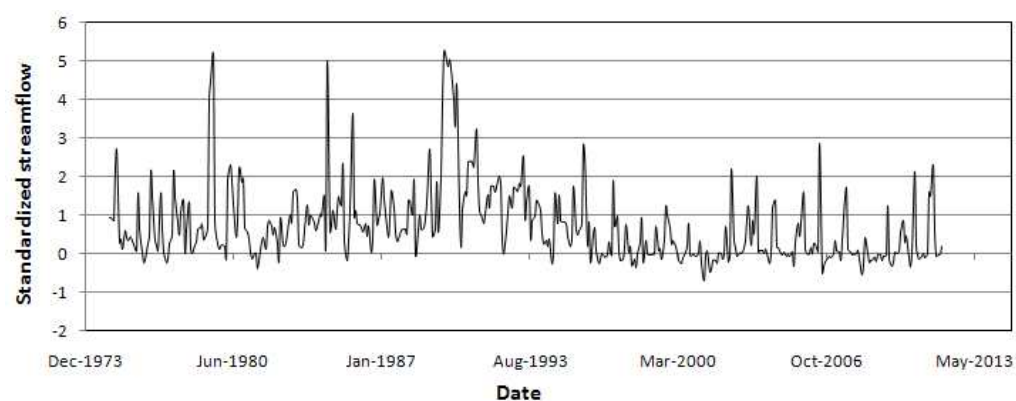


Figure A.12 Reconstructed standardized monthly streamflow by threshold level method of Yeongwol 1

Appendix B. Tables of goodness of fit tests

Table B.1 Results of goodness of fit test (duration – Jucheon)

Distribution	Chi-squared test					
	statistics	p-value	rejected on the level of significance?			
			0.2	0.1	0.05	0.01
Normal	7.0309	0.07092	Y	Y	N	N
Lognormal	5.0705	0.16671	Y	N	N	N
Exponential	3.0557	0.38312	N	N	N	N
Gamma	0.93766	0.81633	N	N	N	N
Pareto	1.2496	0.74113	N	N	N	N
Weibull	3.7816	0.2860	N	N	N	N
GEV	7.1621	0.06691	Y	Y	N	N

Table B.2 Results of goodness of fit test (duration – Jucheon)

Distribution	Anderson–Darling test					
	statistics	p-value	rejected on the level of significance?			
			0.2	0.1	0.05	0.01
Normal	5.1271		Y	Y	Y	Y
Lognormal	2.7015		Y	Y	Y	N
Exponential	3.1275		Y	Y	Y	N
Gamma	3.7223		Y	Y	Y	N
Pareto	2.4849		Y	Y	N	N
Weibull	2.9338		Y	Y	Y	N
GEV	2.6196		Y	Y	Y	N

Table B.3 Results of goodness of fit test (duration – Jucheon)

Distribution	K-S test					
	statistics	p-value	rejected on the level of significance?			
			0.2	0.1	0.05	0.01
Normal	0.29339	0.00215	Y	Y	Y	Y
Lognormal	0.27899	0.00416	Y	Y	Y	Y
Exponential	0.25871	0.00988	Y	Y	Y	Y
Gamma	0.37051	0.00034	Y	Y	Y	Y
Pareto	0.27957	0.00405	Y	Y	Y	Y
Weibull	0.2451	0.01701	Y	Y	Y	N
GEV	0.28002	0.00397	Y	Y	Y	Y

Table B.4 Results of goodness of fit test (severity – Jucheon)

Distribution	Chi-squared test					
	statistics	p-value	rejected on the level of significance?			
			0.2	0.1	0.05	0.01
Normal	12.205	0.00224	Y	Y	Y	Y
Lognormal	0.70901	0.98247	N	N	N	N
Exponential	17.451	0.05708	Y	Y	Y	Y
Gamma	20.769	0.00345	Y	Y	Y	Y
Pareto	22.374	0.00545	Y	Y	Y	Y
Weibull	0.92722	0.92062	N	N	N	N
GEV	1.4249	0.83986	N	N	N	N

Table B.5 Results of goodness of fit test (severity – Jucheon)

Distribution	Anderson-Darling test					
	statistics	p-value	rejected on the level of significance?			
			0.2	0.1	0.05	0.01
Normal	6.6416		Y	Y	Y	Y
Lognormal	0.23736		N	N	N	N
Exponential	7.4351		Y	Y	Y	Y
Gamma	4.0952		Y	Y	Y	Y
Pareto	6.0601		Y	Y	Y	Y
Weibull	0.89332		N	N	N	N
GEV	0.72996		N	N	N	N

Table B.6 Results of goodness of fit test (severity – Jucheon)

Distribution	K-S test					
	statistics	p-value	rejected on the level of significance?			
			0.2	0.1	0.05	0.01
Normal	0.35385	0.00922	Y	Y	Y	Y
Lognormal	0.07662	0.96646	N	N	N	N
Exponential	0.30765	0.00109	Y	Y	Y	Y
Gamma	0.28388	0.00334	Y	Y	Y	Y
Pareto	0.30112	0.00149	Y	Y	Y	Y
Weibull	0.10342	0.7729	N	N	N	N
GEV	0.1145	0.6594	N	N	N	N

Table B.7 Results of goodness of fit test (duration – Jeongseon 2)

Distribution	Chi-squared test					
	statistics	p-value	rejected on the level of significance?			
			0.2	0.1	0.05	0.01
Normal	18.362	0.00182	Y	Y	Y	Y
Lognormal	5.0047	0.15606	Y	N	N	N
Exponential	4.8875	0.18022	Y	N	N	N
Gamma	5.9739	0.11288	Y	N	N	N
Pareto	19.805	0.00186	Y	Y	Y	Y
Weibull	4.4803	0.21405	N	N	N	N
GEV	5.3541	0.14763	Y	N	N	N

Table B.8 Results of goodness of fit test (duration – Jeongseon 2)

Distribution	Anderson-Darling test					
	statistics	p-value	rejected on the level of significance?			
			0.2	0.1	0.05	0.01
Normal	5.633		Y	Y	Y	Y
Lognormal	2.477		Y	Y	N	N
Exponential	3.6407		Y	Y	Y	N
Gamma	3.7771		Y	Y	Y	N
Pareto	1.7142		Y	N	N	N
Weibull	3.148		Y	Y	Y	N
GEV	2.1279		Y	Y	N	N

Table B.9 Results of goodness of fit test (duration – Jeongseon 2)

Distribution	K-S test					
	statistics	p-value	rejected on the level of significance?			
			0.2	0.1	0.05	0.01
Normal	0.35255	0.00128	Y	Y	Y	Y
Lognormal	0.21981	0.04745	Y	Y	N	N
Exponential	0.27727	0.00525	Y	Y	Y	Y
Gamma	0.36509	0.00628	Y	Y	Y	Y
Pareto	0.40541	0.00523	Y	Y	Y	Y
Weibull	0.22524	0.03942	Y	Y	Y	N
GEV	0.21855	0.0495	Y	Y	Y	N

Table B.10 Results of goodness of fit test (severity – Jeongseon 2)

Distribution	Chi-squared test					
	statistics	p-value	rejected on the level of significance?			
			0.2	0.1	0.05	0.01
Normal	10.157	0.00623	Y	Y	Y	Y
Lognormal	4.2775	0.36975	N	N	N	N
Exponential	17.609	0.00529	Y	Y	Y	Y
Gamma	33.103	0.00030	Y	Y	Y	Y
Pareto	9.0537	0.02859	Y	Y	Y	N
Weibull	4.8138	0.18595	Y	N	N	N
GEV	4.3336	0.36274	N	N	N	N

Table B.11 Results of goodness of fit test (severity – Jeongseon 2)

Distribution	Anderson-Darling test					
	statistics	p-value	rejected on the level of significance?			
			0.2	0.1	0.05	0.01
Normal	6.8133		Y	Y	Y	Y
Lognormal	0.53419		N	N	N	N
Exponential	6.0952		Y	Y	Y	Y
Gamma	4.947		Y	Y	Y	Y
Pareto	4.8761		Y	Y	Y	Y
Weibull	1.7102		Y	N	N	N
GEV	0.76432		N	N	N	N

Table B.12 Results of goodness of fit test (severity – Jeongseon 2)

Distribution	K-S test					
	statistics	p-value	rejected on the level of significance?			
			0.2	0.1	0.05	0.01
Normal	0.31463	0.00938	Y	Y	Y	Y
Lognormal	0.13281	0.49034	N	N	N	N
Exponential	0.32466	0.00567	Y	Y	Y	Y
Gamma	0.34247	0.00223	Y	Y	Y	Y
Pareto	0.25412	0.01358	Y	Y	Y	N
Weibull	0.16133	0.26117	N	N	N	N
GEV	0.13158	0.50214	N	N	N	N

Table B.13 Results of goodness of fit test (duration – Pyeongchang)

Distribution	Chi-squared test					
	statistics	p-value	rejected on the level of significance?			
			0.2	0.1	0.05	0.01
Normal	7.7269	0.05201	Y	Y	N	N
Lognormal	7.2386	0.06467	Y	Y	N	N
Exponential	5.8401	0.11965	Y	N	N	N
Gamma	8.3194	0.08055	Y	Y	N	N
Pareto	13.002	0.00463	Y	Y	Y	Y
Weibull	5.6691	0.12887	Y	N	N	N
GEV	7.2707	0.06375	Y	Y	N	N

Table B.14 Results of goodness of fit test (duration – Pyeongchang)

Distribution	Anderson-Darling test					
	statistics	p-value	rejected on the level of significance?			
			0.2	0.1	0.05	0.01
Normal	4.7806		Y	Y	Y	Y
Lognormal	1.702		Y	N	N	N
Exponential	2.1505		Y	Y	N	N
Gamma	2.5679		Y	Y	Y	N
Pareto	5.4028		Y	Y	Y	Y
Weibull	2.3571		Y	Y	N	N
GEV	1.5312		Y	N	N	N

Table B.15 Results of goodness of fit test (duration – Pyeongchang)

Distribution	K-S test					
	statistics	p-value	rejected on the level of significance?			
			0.2	0.1	0.05	0.01
Normal	0.26327	0.00711	Y	Y	Y	Y
Lognormal	0.20633	0.06209	Y	Y	N	N
Exponential	0.22177	0.03639	Y	Y	Y	N
Gamma	0.29519	0.00166	Y	Y	Y	Y
Pareto	0.33333	0.00029	Y	Y	Y	Y
Weibull	0.22524	0.0321	Y	Y	Y	N
GEV	0.18456	0.12333	Y	N	N	N

Table B.16 Results of goodness of fit test (severity – Pyeongchang)

Distribution	Chi-squared test					
	statistics	p-value	rejected on the level of significance?			
			0.2	0.1	0.05	0.01
Normal	10.554	0.00511	Y	Y	Y	Y
Lognormal	0.86003	0.93022	N	N	N	N
Exponential	14.61	0.00218	Y	Y	Y	Y
Gamma	3.1912	0.67054	N	N	N	N
Pareto	7.9838	0.04635	Y	Y	N	N
Weibull	1.7098	0.78894	N	N	N	N
GEV	3.9108	0.27126	N	N	N	N

Table B.17 Results of goodness of fit test (severity – Pyeongchang)

Distribution	Anderson-Darling test					
	statistics	p-value	rejected on the level of significance?			
			0.2	0.1	0.05	0.01
Normal	4.7095		Y	Y	Y	Y
Lognormal	0.30289		N	N	N	N
Exponential	4.1978		Y	Y	Y	Y
Gamma	1.1205		N	N	N	N
Pareto	6.3245		Y	Y	Y	Y
Weibull	0.57987		N	N	N	N
GEV	0.9986		N	N	N	N

Table B.18 Results of goodness of fit test (severity – Pyeongchang)

Distribution	K-S test					
	statistics	p-value	rejected on the level of significance?			
			0.2	0.1	0.05	0.01
Normal	0.26742	0.00594	Y	Y	Y	Y
Lognormal	0.10998	0.69207	N	N	N	N
Exponential	0.25446	0.0103	Y	Y	Y	N
Gamma	0.17127	0.18046	Y	N	N	N
Pareto	0.25769	0.00901	Y	Y	Y	Y
Weibull	0.09494	0.84091	N	N	N	N
GEV	0.12653	0.51934	N	N	N	N

Table B.19 Results of goodness of fit test (duration – Yeongwol 1)

Distribution	Chi-squared test					
	statistics	p-value	rejected on the level of significance?			
			0.2	0.1	0.05	0.01
Normal	5.231	0.02219	Y	Y	Y	N
Lognormal	2.2003	0.33283	N	N	N	N
Exponential	10.667	0.00109	Y	Y	Y	Y
Gamma	1.6595	0.43616	N	N	N	N
Pareto	10.936	0.00422	Y	Y	Y	Y
Weibull	1.522	0.46721	N	N	N	N
GEV	2.1751	0.33704	N	N	N	N

Table B.20 Results of goodness of fit test (duration – Yeongwol 1)

Distribution	Anderson-Darling test					
	statistics	p-value	rejected on the level of significance?			
			0.2	0.1	0.05	0.01
Normal	3.7259		Y	Y	Y	N
Lognormal	1.9087		Y	N	N	N
Exponential	2.802		Y	Y	Y	N
Gamma	2.4614		Y	Y	N	N
Pareto	1.2319		N	N	N	N
Weibull	2.0966		Y	Y	N	N
GEV	1.7463		Y	N	N	N

Table B.21 Results of goodness of fit test (duration – Yeongwol 1)

Distribution	K-S test					
	statistics	p-value	rejected on the level of significance?			
			0.2	0.1	0.05	0.01
Normal	0.32213	0.01024	Y	Y	Y	N
Lognormal	0.25857	0.06654	Y	Y	N	N
Exponential	0.3278	0.00848	Y	Y	Y	Y
Gamma	0.36839	0.00198	Y	Y	Y	Y
Pareto	0.45833	0.00039	Y	Y	Y	Y
Weibull	0.24992	0.08304	Y	N	N	N
GEV	0.25157	0.07965	Y	Y	N	N

Table B.22 Results of goodness of fit test (severity – Yeongwol 1)

Distribution	Chi-squared test					
	statistics	p-value	rejected on the level of significance?			
			0.2	0.1	0.05	0.01
Normal	6.9266	0.00849	Y	Y	Y	Y
Lognormal	1.4802	0.47707	N	N	N	N
Exponential	4.3168	0.22923	N	N	N	N
Gamma	6.6388	0.03618	Y	Y	Y	N
Pareto	1.3692	0.24195	N	N	N	N
Weibull	3.0278	0.22005	N	N	N	N
GEV	3.186	0.20331	N	N	N	N

Table B.23 Results of goodness of fit test (severity – Yeongwol 1)

Distribution	Anderson-Darling test					
	statistics	p-value	rejected on the level of significance?			
			0.2	0.1	0.05	0.01
Normal	3.6662		Y	Y	Y	N
Lognormal	0.441		N	N	N	N
Exponential	1.247		N	N	N	N
Gamma	1.4457		Y	N	N	N
Pareto	6.5834		Y	Y	Y	Y
Weibull	0.6148		N	N	N	N
GEV	0.21909		N	N	N	N

Table B.24 Results of goodness of fit test (severity – Yeongwol 1)

Distribution	K-S test					
	statistics	p-value	rejected on the level of significance?			
			0.2	0.1	0.05	0.01
Normal	0.32854	0.00828	Y	Y	Y	Y
Lognormal	0.1166	0.86289	N	N	N	N
Exponential	0.21406	0.19146	Y	N	N	N
Gamma	0.2071	0.22167	N	N	N	N
Pareto	0.37876	0.00133	Y	Y	Y	Y
Weibull	0.12328	0.81629	N	N	N	N
GEV	0.08713	0.98575	N	N	N	N

Appendix C. Tables of drought return periods

Table C.1 Drought return periods of Jucheon when severity exceeds 0.1

Duration (month)	T_D (year)	T_S (year)	T_{DS} (year)	T'_{DS} (year)	$T_{D S>s}$ (year)	$T_{S D>d}$ (year)	T_L (year)
1	1.32	1.56	1.93	1.32	1.29	1.29	7.02
2	3.09		3.09	1.93	1.31	1.29	6.14
3	5.08		5.08	1.93	1.75	1.44	6.21
4	7.22		7.22	1.93	2.43	1.58	7.01
5	9.48		9.48	1.93	3.17	1.67	7.59
6	11.85		11.85	1.93	3.95	1.72	6.99
7	14.31		14.31	1.93	4.77	1.75	8.11
8	16.85		16.85	1.93	5.61	1.78	8.71
9	19.46		19.46	1.93	6.47	1.80	9.73
10	22.14		22.14	1.93	7.36	1.82	9.34
11	24.88		24.88	1.93	8.27	1.83	9.32
12	27.67		27.67	1.93	9.20	1.84	9.25
13	30.52		30.52	1.93	10.14	1.85	
14	33.41		33.41	1.93	11.10	1.85	
15	36.36		36.36	1.93	12.08	1.86	

Table C.2 Drought return periods of Jucheon when severity exceeds 0.2

Duration (month)	T_D (year)	T_S (year)	T_{DS} (year)	T'_{DS} (year)	$T_{D S>s}$ (year)	$T_{S D>d}$ (year)	T_L (year)
1	1.32	1.91	2.60	1.32	1.29	1.29	9.67
2	3.09		3.13	2.57	1.57	1.52	7.71
3	5.08		5.08	2.60	2.56	1.94	7.19
4	7.22		7.22	2.60	3.63	2.13	7.76
5	9.48		9.48	2.60	4.77	2.24	7.92
6	11.85		11.85	2.60	5.97	2.31	7.97
7	14.31		14.31	2.60	7.21	2.36	8.61
8	16.85		16.85	2.60	8.48	2.40	9.50
9	19.46		19.46	2.60	9.80	2.43	10.19
10	22.14		22.14	2.60	11.15	2.45	10.35
11	24.88		24.88	2.60	12.53	2.46	9.87
12	27.67		27.67	2.60	13.93	2.48	9.58
13	30.52		30.52	2.60	15.37	2.49	
14	33.41		33.41	2.60	16.83	2.50	
15	36.36		36.36	2.60	18.31	2.51	

Table C.3 Drought return periods of Jucheon when severity exceeds 0.3

Duration (month)	T_D (year)	T_S (year)	T_{DS} (year)	T'_{DS} (year)	$T_{D S>s}$ (year)	$T_{S D>d}$ (year)	T_L (year)
1	1.32	2.27	3.28	1.32	1.29	1.29	14.75
2	3.09		3.44	2.95	1.87	1.91	9.51
3	5.08		5.13	3.25	3.08	2.44	8.31
4	7.22		7.24	3.27	4.38	2.69	8.55
5	9.48		9.50	3.27	5.75	2.83	8.77
6	11.85		11.87	3.27	7.18	2.92	8.99
7	14.31		14.33	3.27	8.68	2.98	9.25
8	16.85		16.87	3.27	10.22	3.02	9.72
9	19.46		19.48	3.27	11.80	3.06	10.35
10	22.14		22.16	3.27	13.42	3.08	11.19
11	24.88		24.90	3.27	15.08	3.11	10.59
12	27.67		27.70	3.27	16.78	3.12	10.02
13	30.52		30.55	3.27	18.50	3.14	
14	33.41		33.44	3.27	20.26	3.15	
15	36.36		36.39	3.27	22.04	3.16	

Table C.4 Drought return periods of Jucheon when severity exceeds 0.4

Duration (month)	T_D (year)	T_S (year)	T_{DS} (year)	T'_{DS} (year)	$T_{D S>s}$ (year)	$T_{S D>d}$ (year)	T_L (year)
1	1.32	2.65	3.97	1.32	1.29	1.29	5.22
2	3.09		4.04	3.05	2.09	2.31	11.67
3	5.08		5.31	3.84	3.43	2.96	14.53
4	7.22		7.35	3.93	4.87	3.26	17.78
5	9.48		9.59	3.95	6.40	3.43	21.88
6	11.85		11.95	3.96	8.00	3.54	20.97
7	14.31		14.41	3.96	9.66	3.61	25.91
8	16.85		16.95	3.97	11.38	3.67	
9	19.46		19.57	3.97	13.14	3.71	
10	22.14		22.25	3.97	14.95	3.74	
11	24.88		25.00	3.97	16.80	3.77	
12	27.67		27.80	3.97	18.69	3.79	
13	30.52		30.66	3.97	20.61	3.80	
14	33.41		33.56	3.97	22.56	3.82	
15	36.36		36.51	3.97	24.55	3.83	

Table C.5 Drought return periods of Jucheon when severity exceeds 0.5

Duration (month)	T_D (year)	T_S (year)	T_{DS} (year)	T'_{DS} (year)	$T_{D S>s}$ (year)	$T_{S D>d}$ (year)	T_L (year)
1	1.32	3.03	4.69	1.32	1.29	1.30	7.43
2	3.09		4.73	3.07	2.24	2.73	14.99
3	5.08		5.68	4.27	3.68	3.50	15.64
4	7.22		7.57	4.55	5.23	3.85	20.71
5	9.48		9.78	4.62	6.88	4.05	27.83
6	11.85		12.13	4.65	8.59	4.18	30.11
7	14.31		14.59	4.66	10.38	4.27	32.46
8	16.85		17.14	4.67	12.22	4.33	
9	19.46		19.77	4.67	14.11	4.38	
10	22.14		22.47	4.68	16.05	4.42	
11	24.88		25.22	4.68	18.04	4.45	
12	27.67		28.04	4.68	20.07	4.47	
13	30.52		30.91	4.68	22.13	4.49	
14	33.41		33.83	4.68	24.23	4.51	
15	36.36		36.80	4.68	26.36	4.53	

Table C.6 Drought return periods of Jucheon when severity exceeds 0.6

Duration (month)	T_D (year)	T_S (year)	T_{DS} (year)	T'_{DS} (year)	$T_{D S>s}$ (year)	$T_{S D>d}$ (year)	T_L (year)
1	1.32	3.43	5.44	1.32	1.29	1.32	9.97
2	3.09		5.46	3.08	2.36	3.17	18.17
3	5.08		6.20	4.55	3.87	4.06	25.33
4	7.22		7.94	5.09	5.50	4.47	28.56
5	9.48		10.09	5.25	7.23	4.70	29.98
6	11.85		12.44	5.32	9.04	4.85	35.04
7	14.31		14.90	5.36	10.92	4.95	38.78
8	16.85		17.47	5.38	12.85	5.02	
9	19.46		20.11	5.39	14.85	5.08	
10	22.14		22.83	5.40	16.89	5.12	
11	24.88		25.61	5.40	18.98	5.16	
12	27.67		28.45	5.41	21.11	5.18	
13	30.52		31.35	5.41	23.28	5.21	
14	33.41		34.30	5.41	25.49	5.23	
15	36.36		37.30	5.42	27.73	5.24	

Table C.7 Drought return periods of Jucheon when severity exceeds 0.7

Duration (month)	T_D (year)	T_S (year)	T_{DS} (year)	T'_{DS} (year)	$T_{D S>s}$ (year)	$T_{S D>d}$ (year)	T_L (year)
1	1.32	3.85	6.21	1.32	1.29	1.34	18.23
2	3.09		6.23	3.09	2.45	3.62	29.32
3	5.08		6.84	4.72	4.02	4.63	33.17
4	7.22		8.44	5.52	5.72	5.10	35.34
5	9.48		10.54	5.83	7.51	5.37	38.24
6	11.85		12.87	5.96	9.39	5.53	43.12
7	14.31		15.35	6.03	11.34	5.65	43.38
8	16.85		17.93	6.07	13.35	5.74	
9	19.46		20.61	6.10	15.42	5.80	
10	22.14		23.35	6.12	17.54	5.85	
11	24.88		26.17	6.13	19.71	5.89	
12	27.67		29.05	6.14	21.92	5.92	
13	30.52		31.99	6.15	24.18	5.95	
14	33.41		34.98	6.16	26.48	5.97	
15	36.36		38.01	6.16	28.81	5.99	

Table C.8 Drought return periods of Jucheon when severity exceeds 0.8

Duration (month)	T_D (year)	T_S (year)	T_{DS} (year)	T'_{DS} (year)	$T_{D S>s}$ (year)	$T_{S D>d}$ (year)	T_L (year)
1	1.32	4.28	7.01	1.32	1.29	1.37	26.81
2	3.09		7.03	3.09	2.52	4.09	36.27
3	5.08		7.56	4.82	4.14	5.23	36.51
4	7.22		9.05	5.86	5.89	5.76	37.03
5	9.48		11.11	6.33	7.74	6.06	42.02
6	11.85		13.43	6.55	9.67	6.25	46.81
7	14.31		15.92	6.68	11.68	6.38	47.13
8	16.85		18.54	6.76	13.75	6.47	
9	19.46		21.25	6.81	15.88	6.55	
10	22.14		24.04	6.84	18.07	6.60	
11	24.88		26.90	6.87	20.30	6.65	
12	27.67		29.83	6.89	22.58	6.68	
13	30.52		32.81	6.90	24.90	6.72	
14	33.41		35.86	6.91	27.27	6.74	
15	36.36		38.95	6.92	29.67	6.76	

Table C.9 Drought return periods of Jucheon when severity exceeds 0.9

Duration (month)	T_D (year)	T_S (year)	T_{DS} (year)	T'_{DS} (year)	$T_{D S>s}$ (year)	$T_{S D>d}$ (year)	T_L (year)
1	1.32	4.72	7.84	1.32	1.29	1.41	31.18
2	3.09		7.85	3.09	2.58	4.57	39.02
3	5.08		8.34	4.89	4.24	5.85	42.31
4	7.22		9.76	6.11	6.03	6.44	43.87
5	9.48		11.77	6.75	7.92	6.77	47.21
6	11.85		14.10	7.09	9.90	6.99	47.47
7	14.31		16.62	7.29	11.96	7.13	47.89
8	16.85		19.27	7.41	14.08	7.24	
9	19.46		22.02	7.49	16.26	7.32	
10	22.14		24.87	7.55	18.50	7.38	
11	24.88		27.79	7.59	20.78	7.43	
12	27.67		30.77	7.62	23.12	7.48	
13	30.52		33.82	7.65	25.50	7.51	
14	33.41		36.93	7.67	27.92	7.54	
15	36.36		40.09	7.69	30.38	7.56	

Table C.10 Drought return periods of Jucheon when severity exceeds 1.0

Duration (month)	T_D (year)	T_S (year)	T_{DS} (year)	T'_{DS} (year)	$T_{D S>s}$ (year)	$T_{S D>d}$ (year)	T_L (year)
1	1.32	5.18	8.70	1.32	1.29	1.46	35.61
2	3.09		8.71	3.09	2.63	5.07	42.77
3	5.08		9.16	4.93	4.32	6.49	43.11
4	7.22		10.53	6.31	6.15	7.15	46.61
5	9.48		12.52	7.11	8.08	7.52	47.42
6	11.85		14.87	7.57	10.09	7.75	48.16
7	14.31		17.42	7.85	12.19	7.92	49.02
8	16.85		20.11	8.03	14.35	8.03	
9	19.46		22.93	8.15	16.58	8.12	
10	22.14		25.83	8.24	18.86	8.19	
11	24.88		28.82	8.30	21.19	8.25	
12	27.67		31.87	8.35	23.57	8.29	
13	30.52		35.00	8.39	25.99	8.33	
14	33.41		38.18	8.43	28.46	8.36	
15	36.36		41.42	8.45	30.97	8.39	

Table C.11 Drought return periods of Jeongseon 2 when severity exceeds 0.1

Duration (month)	T_D (year)	T_S (year)	T_{DS} (year)	T'_{DS} (year)	$T_{D S>s}$ (year)	$T_{S D>d}$ (year)	T_L (year)
1	1.60	1.56	1.60	1.56	1.30	1.30	7.02
2	2.36		2.36	1.56	1.30	1.30	7.87
3	3.42		3.42	1.56	1.30	1.30	8.31
4	4.72		4.72	1.56	1.34	1.30	9.43
5	6.21		6.21	1.56	1.46	1.30	9.81
6	7.89		7.89	1.56	1.67	1.31	11.13
7	9.75		9.75	1.56	1.95	1.36	12.55
8	11.77		11.77	1.56	2.28	1.39	12.51
9	13.96		13.96	1.56	2.65	1.42	
10	16.30		16.30	1.56	3.05	1.44	
11	18.79		18.79	1.56	3.49	1.46	
12	21.43		21.43	1.56	3.95	1.47	
13	24.21		24.21	1.56	4.44	1.48	
14	27.12		27.12	1.56	4.96	1.49	
15	30.17		30.17	1.56	5.50	1.50	

Table C.12 Drought return periods of Jeongseon 2 when severity exceeds 0.2

Duration (month)	T_D (year)	T_S (year)	T_{DS} (year)	T'_{DS} (year)	$T_{D S>s}$ (year)	$T_{S D>d}$ (year)	T_L (year)
1	1.60	1.91	1.91	1.60	1.30	1.30	6.01
2	2.36		2.37	1.91	1.30	1.30	7.91
3	3.42		3.42	1.91	1.34	1.30	9.97
4	4.72		4.72	1.91	1.59	1.39	11.79
5	6.21		6.21	1.91	2.03	1.51	14.12
6	7.89		7.89	1.91	2.56	1.60	18.48
7	9.75		9.75	1.91	3.15	1.66	22.31
8	11.77		11.77	1.91	3.80	1.70	
9	13.96		13.96	1.91	4.50	1.73	
10	16.30		16.30	1.91	5.26	1.76	
11	18.79		18.79	1.91	6.06	1.78	
12	21.43		21.43	1.91	6.91	1.80	
13	24.21		24.21	1.91	7.80	1.81	
14	27.12		27.12	1.91	8.74	1.82	
15	30.17		30.17	1.91	9.72	1.83	

Table C.13 Drought return periods of Jeongseon 2 when severity exceeds 0.3

Duration (month)	T_D (year)	T_S (year)	T_{DS} (year)	T'_{DS} (year)	$T_{D S>s}$ (year)	$T_{S D>d}$ (year)	T_L (year)
1	1.60	2.27	2.27	1.60	1.30	1.30	6.94
2	2.36		2.41	2.23	1.30	1.30	9.23
3	3.42		3.43	2.27	1.51	1.42	10.99
4	4.72		4.72	2.27	2.03	1.65	15.03
5	6.21		6.21	2.27	2.67	1.80	17.45
6	7.89		7.89	2.27	3.39	1.90	19.05
7	9.75		9.75	2.27	4.19	1.97	24.01
8	11.77		11.77	2.27	5.06	2.02	
9	13.96		13.96	2.27	6.00	2.06	
10	16.30		16.30	2.27	7.00	2.09	
11	18.79		18.79	2.27	8.07	2.12	
12	21.43		21.43	2.27	9.20	2.14	
13	24.21		24.21	2.27	10.40	2.15	
14	27.12		27.12	2.27	11.65	2.17	
15	30.17		30.17	2.27	12.96	2.18	

Table C.14 Drought return periods of Jeongseon 2 when severity exceeds 0.4

Duration (month)	T_D (year)	T_S (year)	T_{DS} (year)	T'_{DS} (year)	$T_{D S>s}$ (year)	$T_{S D>d}$ (year)	T_L (year)
1	1.60	2.65	2.65	1.60	1.30	1.30	7.38
2	2.36		2.67	2.35	1.32	1.32	9.93
3	3.42		3.44	2.64	1.75	1.65	16.04
4	4.72		4.72	2.65	2.41	1.92	20.12
5	6.21		6.21	2.65	3.17	2.10	26.67
6	7.89		7.89	2.65	4.03	2.21	29.82
7	9.75		9.75	2.65	4.97	2.30	31.82
8	11.77		11.78	2.65	6.01	2.36	
9	13.96		13.96	2.65	7.12	2.40	
10	16.30		16.30	2.65	8.32	2.44	
11	18.79		18.79	2.65	9.59	2.47	
12	21.43		21.43	2.65	10.93	2.49	
13	24.21		24.21	2.65	12.35	2.51	
14	27.12		27.12	2.65	13.84	2.52	
15	30.17		30.17	2.65	15.39	2.53	

Table C.15 Drought return periods of Jeongseon 2 when severity exceeds 0.5

Duration (month)	T_D (year)	T_S (year)	T_{DS} (year)	T'_{DS} (year)	$T_{D S>s}$ (year)	$T_{S D>d}$ (year)	T_L (year)
1	1.60	3.04	3.04	1.60	1.30	1.30	8.12
2	2.36		3.04	2.36	1.38	1.42	10.89
3	3.42		3.51	2.97	1.96	1.89	18.57
4	4.72		4.73	3.03	2.70	2.20	25.14
5	6.21		6.22	3.03	3.56	2.40	32.04
6	7.89		7.90	3.03	4.52	2.54	35.35
7	9.75		9.75	3.04	5.58	2.63	36.91
8	11.77		11.78	3.04	6.74	2.70	
9	13.96		13.96	3.04	7.99	2.75	
10	16.30		16.31	3.04	9.34	2.79	
11	18.79		18.80	3.04	10.76	2.83	
12	21.43		21.43	3.04	12.27	2.85	
13	24.21		24.21	3.04	13.86	2.87	
14	27.12		27.12	3.04	15.53	2.89	
15	30.17		30.17	3.04	17.28	2.91	

Table C.16 Drought return periods of Jeongseon 2 when severity exceeds 0.6

Duration (month)	T_D (year)	T_S (year)	T_{DS} (year)	T'_{DS} (year)	$T_{D S>s}$ (year)	$T_{S D>d}$ (year)	T_L (year)
1	1.60	3.44	3.44	1.60	1.30	1.30	11.23
2	2.36		3.44	2.36	1.48	1.57	16.47
3	3.42		3.70	3.20	2.13	2.13	24.46
4	4.72		4.78	3.40	2.94	2.49	31.76
5	6.21		6.24	3.43	3.86	2.72	35.61
6	7.89		7.91	3.43	4.91	2.87	37.39
7	9.75		9.76	3.43	6.07	2.98	37.67
8	11.77		11.79	3.43	7.33	3.06	
9	13.96		13.98	3.44	8.69	3.12	
10	16.30		16.32	3.44	10.15	3.16	
11	18.79		18.81	3.44	11.70	3.20	
12	21.43		21.44	3.44	13.34	3.23	
13	24.21		24.22	3.44	15.07	3.25	
14	27.12		27.14	3.44	16.88	3.27	
15	30.17		30.19	3.44	18.78	3.29	

Table C.17 Drought return periods of Jeongseon 2 when severity exceeds 0.7

Duration (month)	T_D (year)	T_S (year)	T_{DS} (year)	T'_{DS} (year)	$T_{D S>s}$ (year)	$T_{S D>d}$ (year)	T_L (year)
1	1.60	3.85	3.85	1.60	1.30	1.31	15.03
2	2.36		3.85	2.36	1.57	1.75	20.99
3	3.42		4.00	3.32	2.27	2.39	30.51
4	4.72		4.89	3.74	3.13	2.79	34.63
5	6.21		6.29	3.82	4.12	3.05	38.41
6	7.89		7.95	3.84	5.23	3.22	38.49
7	9.75		9.79	3.84	6.46	3.34	39.47
8	11.77		11.82	3.85	7.81	3.43	
9	13.96		14.00	3.85	9.26	3.49	
10	16.30		16.34	3.85	10.81	3.54	
11	18.79		18.83	3.85	12.46	3.58	
12	21.43		21.47	3.85	14.21	3.62	
13	24.21		24.25	3.85	16.05	3.64	
14	27.12		27.17	3.85	17.98	3.67	
15	30.17		30.22	3.85	20.00	3.68	

Table C.18 Drought return periods of Jeongseon 2 when severity exceeds 0.8

Duration (month)	T_D (year)	T_S (year)	T_{DS} (year)	T'_{DS} (year)	$T_{D S>s}$ (year)	$T_{S D>d}$ (year)	T_L (year)
1	1.60	4.28	4.28	1.60	1.30	1.32	16.72
2	2.36		4.28	2.36	1.65	1.94	26.54
3	3.42		4.37	3.37	2.39	2.66	33.11
4	4.72		5.07	4.02	3.29	3.10	35.42
5	6.21		6.39	4.20	4.33	3.38	38.98
6	7.89		8.01	4.24	5.50	3.57	41.77
7	9.75		9.85	4.26	6.79	3.71	43.16
8	11.77		11.87	4.27	8.20	3.81	
9	13.96		14.05	4.27	9.73	3.88	
10	16.30		16.39	4.27	11.36	3.94	
11	18.79		18.89	4.27	13.09	3.98	
12	21.43		21.53	4.27	14.93	4.02	
13	24.21		24.31	4.28	16.87	4.05	
14	27.12		27.23	4.28	18.90	4.07	
15	30.17		30.29	4.28	21.02	4.09	

Table C.19 Drought return periods of Jeongseon 2 when severity exceeds 0.9

Duration (month)	T_D (year)	T_S (year)	T_{DS} (year)	T'_{DS} (year)	$T_{D S>s}$ (year)	$T_{S D>d}$ (year)	T_L (year)
1	1.60	4.72	4.72	1.60	1.30	1.35	24.72
2	2.36		4.72	2.36	1.71	2.13	28.89
3	3.42		4.78	3.39	2.48	2.93	35.71
4	4.72		5.33	4.23	3.42	3.42	38.22
5	6.21		6.54	4.55	4.50	3.73	44.20
6	7.89		8.12	4.64	5.72	3.94	44.11
7	9.75		9.94	4.68	7.07	4.09	45.48
8	11.77		11.95	4.69	8.54	4.20	
9	13.96		14.14	4.70	10.12	4.28	
10	16.30		16.48	4.71	11.82	4.35	
11	18.79		18.98	4.71	13.63	4.40	
12	21.43		21.62	4.71	15.54	4.44	
13	24.21		24.41	4.71	17.55	4.47	
14	27.12		27.33	4.71	19.67	4.50	
15	30.17		30.40	4.72	21.88	4.52	

Table C.20 Drought return periods of Jeongseon 2 when severity exceeds 1.0

Duration (month)	T_D (year)	T_S (year)	T_{DS} (year)	T'_{DS} (year)	$T_{D S>s}$ (year)	$T_{S D>d}$ (year)	T_L (year)
1	1.60	5.18	5.18	1.60	1.30	1.38	28.12
2	2.36		5.18	2.36	1.77	2.34	30.51
3	3.42		5.22	3.41	2.57	3.22	36.88
4	4.72		5.66	4.37	3.53	3.75	42.44
5	6.21		6.76	4.85	4.65	4.10	45.08
6	7.89		8.28	5.02	5.91	4.33	45.55
7	9.75		10.08	5.09	7.31	4.49	47.62
8	11.77		12.08	5.12	8.82	4.61	
9	13.96		14.26	5.14	10.46	4.70	
10	16.30		16.61	5.15	12.22	4.77	
11	18.79		19.11	5.15	14.08	4.82	
12	21.43		21.76	5.16	16.06	4.86	
13	24.21		24.55	5.16	18.14	4.90	
14	27.12		27.49	5.16	20.33	4.93	
15	30.17		30.56	5.17	22.61	4.96	

Table C.21 Drought return periods of Pyeongchang when severity exceeds 0.1

Duration (month)	T_D (year)	T_S (year)	T_{DS} (year)	T'_{DS} (year)	$T_{D S>s}$ (year)	$T_{S D>d}$ (year)	T_L (year)
1	1.64	1.59	1.64	1.59	1.38	1.38	4.64
2	2.33		2.33	1.59	1.38	1.38	9.32
3	3.34		3.34	1.59	1.38	1.38	16.81
4	4.65		4.65	1.59	1.39	1.38	20.22
5	6.22		6.22	1.59	1.42	1.38	23.04
6	8.06		8.06	1.59	1.53	1.38	24.71
7	10.16		10.16	1.59	1.71	1.39	27.11
8	12.52		12.52	1.59	1.97	1.41	
9	15.14		15.14	1.59	2.28	1.44	
10	18.00		18.00	1.59	2.64	1.47	
11	21.13		21.13	1.59	3.05	1.48	
12	24.50		24.50	1.59	3.49	1.50	
13	28.13		28.13	1.59	3.98	1.51	
14	32.00		32.00	1.59	4.49	1.52	
15	36.12		36.12	1.59	5.05	1.53	

Table C.22 Drought return periods of Pyeongchang when severity exceeds 0.2

Duration (month)	T_D (year)	T_S (year)	T_{DS} (year)	T'_{DS} (year)	$T_{D S>s}$ (year)	$T_{S D>d}$ (year)	T_L (year)
1	1.64	1.85	1.85	1.64	1.38	1.38	6.45
2	2.33		2.33	1.85	1.38	1.38	17.52
3	3.34		3.34	1.85	1.39	1.38	17.99
4	4.65		4.65	1.85	1.43	1.39	21.98
5	6.22		6.22	1.85	1.68	1.44	24.37
6	8.06		8.06	1.85	2.09	1.53	26.83
7	10.16		10.16	1.85	2.60	1.60	29.36
8	12.52		12.52	1.85	3.19	1.65	
9	15.14		15.14	1.85	3.85	1.68	
10	18.00		18.00	1.85	4.57	1.71	
11	21.13		21.13	1.85	5.36	1.73	
12	24.50		24.50	1.85	6.21	1.75	
13	28.13		28.13	1.85	7.12	1.76	
14	32.00		32.00	1.85	8.10	1.77	
15	36.12		36.12	1.85	9.15	1.78	

Table C.23 Drought return periods of Pyeongchang when severity exceeds 0.3

Duration (month)	T_D (year)	T_S (year)	T_{DS} (year)	T'_{DS} (year)	$T_{D S>s}$ (year)	$T_{S D>d}$ (year)	T_L (year)
1	1.64	2.12	2.12	1.64	1.38	1.38	10.02
2	2.33		2.33	2.12	1.38	1.38	20.21
3	3.34		3.34	2.12	1.40	1.39	22.52
4	4.65		4.65	2.12	1.65	1.49	26.08
5	6.22		6.22	2.12	2.17	1.65	26.88
6	8.06		8.06	2.12	2.80	1.76	28.74
7	10.16		10.16	2.12	3.53	1.83	30.82
8	12.52		12.52	2.12	4.35	1.89	
9	15.14		15.14	2.12	5.26	1.93	
10	18.00		18.00	2.12	6.26	1.96	
11	21.13		21.13	2.12	7.34	1.98	
12	24.50		24.50	2.12	8.51	2.00	
13	28.13		28.13	2.12	9.77	2.02	
14	32.00		32.00	2.12	11.12	2.03	
15	36.12		36.12	2.12	12.55	2.04	

Table C.24 Drought return periods of Pyeongchang when severity exceeds 0.4

Duration (month)	T_D (year)	T_S (year)	T_{DS} (year)	T'_{DS} (year)	$T_{D S>s}$ (year)	$T_{S D>d}$ (year)	T_L (year)
1	1.64	2.39	2.39	1.64	1.38	1.38	15.38
2	2.33		2.43	2.30	1.38	1.38	23.14
3	3.34		3.34	2.39	1.47	1.43	25.98
4	4.65		4.65	2.39	1.96	1.68	28.91
5	6.22		6.22	2.39	2.62	1.86	31.68
6	8.06		8.06	2.39	3.40	1.98	32.95
7	10.16		10.16	2.39	4.29	2.07	37.59
8	12.52		12.52	2.39	5.28	2.13	
9	15.14		15.14	2.39	6.38	2.18	
10	18.00		18.00	2.39	7.59	2.21	
11	21.13		21.13	2.39	8.91	2.24	
12	24.50		24.50	2.39	10.33	2.26	
13	28.13		28.13	2.39	11.86	2.28	
14	32.00		32.00	2.39	13.50	2.29	
15	36.12		36.12	2.39	15.23	2.30	

Table C.25 Drought return periods of Pyeongchang when severity exceeds 0.5

Duration (month)	T_D (year)	T_S (year)	T_{DS} (year)	T'_{DS} (year)	$T_{D S>s}$ (year)	$T_{S D>d}$ (year)	T_L (year)
1	1.64	2.67	2.67	1.64	1.38	1.38	16.78
2	2.33		2.67	2.33	1.39	1.39	25.61
3	3.34		3.35	2.67	1.62	1.57	27.91
4	4.65		4.65	2.67	2.24	1.87	32.42
5	6.22		6.22	2.67	3.00	2.08	33.84
6	8.06		8.06	2.67	3.88	2.21	37.04
7	10.16		10.16	2.67	4.89	2.31	38.62
8	12.52		12.52	2.67	6.03	2.38	
9	15.14		15.14	2.67	7.29	2.43	
10	18.00		18.00	2.67	8.67	2.47	
11	21.13		21.13	2.67	10.17	2.50	
12	24.50		24.50	2.67	11.80	2.52	
13	28.13		28.13	2.67	13.55	2.54	
14	32.00		32.00	2.67	15.41	2.56	
15	36.12		36.12	2.67	17.40	2.57	

Table C.26 Drought return periods of Pyeongchang when severity exceeds 0.6

Duration (month)	T_D (year)	T_S (year)	T_{DS} (year)	T'_{DS} (year)	$T_{D S>s}$ (year)	$T_{S D>d}$ (year)	T_L (year)
1	1.64	2.95	2.95	1.64	1.38	1.38	22.79
2	2.33		2.95	2.33	1.39	1.39	30.11
3	3.34		3.37	2.93	1.78	1.73	31.48
4	4.65		4.65	2.95	2.47	2.07	33.96
5	6.22		6.22	2.95	3.30	2.29	36.33
6	8.06		8.06	2.95	4.28	2.44	37.81
7	10.16		10.16	2.95	5.39	2.55	41.92
8	12.52		12.52	2.95	6.65	2.63	
9	15.14		15.14	2.95	8.03	2.68	
10	18.00		18.00	2.95	9.56	2.72	
11	21.13		21.13	2.95	11.22	2.76	
12	24.50		24.50	2.95	13.01	2.78	
13	28.13		28.13	2.95	14.93	2.81	
14	32.00		32.00	2.95	16.99	2.82	
15	36.12		36.12	2.95	19.18	2.84	

Table C.27 Drought return periods of Pyeongchang when severity exceeds 0.7

Duration (month)	T_D (year)	T_S (year)	T_{DS} (year)	T'_{DS} (year)	$T_{D S>s}$ (year)	$T_{S D>d}$ (year)	T_L (year)
1	1.64	3.24	3.24	1.64	1.38	1.38	28.14
2	2.33		3.24	2.33	1.40	1.42	30.63
3	3.34		3.46	3.14	1.91	1.90	32.49
4	4.65		4.65	3.23	2.66	2.27	37.34
5	6.22		6.22	3.24	3.56	2.52	36.97
6	8.06		8.06	3.24	4.61	2.68	41.38
7	10.16		10.16	3.24	5.81	2.80	43.75
8	12.52		12.52	3.24	7.16	2.88	
9	15.14		15.14	3.24	8.66	2.94	
10	18.00		18.01	3.24	10.30	2.99	
11	21.13		21.13	3.24	12.09	3.02	
12	24.50		24.50	3.24	14.02	3.05	
13	28.13		28.13	3.24	16.09	3.08	
14	32.00		32.00	3.24	18.31	3.10	
15	36.12		36.12	3.24	20.67	3.11	

Table C.28 Drought return periods of Pyeongchang when severity exceeds 0.8

Duration (month)	T_D (year)	T_S (year)	T_{DS} (year)	T'_{DS} (year)	$T_{D S>s}$ (year)	$T_{S D>d}$ (year)	T_L (year)
1	1.64	3.53	3.53	1.64	1.38	1.38	31.04
2	2.33		3.53	2.33	1.43	1.49	31.31
3	3.34		3.63	3.25	2.03	2.07	34.01
4	4.65		4.67	3.51	2.82	2.48	40.09
5	6.22		6.23	3.52	3.78	2.74	41.88
6	8.06		8.06	3.53	4.90	2.92	44.01
7	10.16		10.16	3.53	6.17	3.05	45.03
8	12.52		12.52	3.53	7.60	3.14	
9	15.14		15.14	3.53	9.19	3.20	
10	18.00		18.01	3.53	10.94	3.26	
11	21.13		21.13	3.53	12.83	3.30	
12	24.50		24.50	3.53	14.88	3.33	
13	28.13		28.13	3.53	17.08	3.35	
14	32.00		32.00	3.53	19.44	3.37	
15	36.12		36.12	3.53	21.94	3.39	

Table C.29 Drought return periods of Pyeongchang when severity exceeds 0.9

Duration (month)	T_D (year)	T_S (year)	T_{DS} (year)	T'_{DS} (year)	$T_{D S>s}$ (year)	$T_{S D>d}$ (year)	T_L (year)
1	1.64	3.82	3.82	1.64	1.38	1.39	31.42
2	2.33		3.82	2.33	1.49	1.58	33.73
3	3.34		3.88	3.30	2.13	2.24	38.99
4	4.65		4.72	3.78	2.96	2.68	41.23
5	6.22		6.24	3.82	3.97	2.97	43.27
6	8.06		8.07	3.82	5.14	3.17	44.92
7	10.16		10.17	3.82	6.48	3.30	46.28
8	12.52		12.52	3.82	7.98	3.40	
9	15.14		15.14	3.82	9.65	3.47	
10	18.00		18.01	3.82	11.48	3.53	
11	21.13		21.13	3.82	13.47	3.57	
12	24.50		24.50	3.82	15.62	3.61	
13	28.13		28.13	3.82	17.94	3.63	
14	32.00		32.00	3.82	20.41	3.66	
15	36.12		36.13	3.82	23.03	3.68	

Table C.30 Drought return periods of Pyeongchang when severity exceeds 1.0

Duration (month)	T_D (year)	T_S (year)	T_{DS} (year)	T'_{DS} (year)	$T_{D S>s}$ (year)	$T_{S D>d}$ (year)	T_L (year)
1	1.64	4.12	4.12	1.64	1.38	1.39	31.91
2	2.33		4.12	2.33	1.55	1.69	37.52
3	3.34		4.15	3.32	2.22	2.42	41.08
4	4.65		4.80	4.01	3.09	2.89	41.72
5	6.22		6.26	4.11	4.13	3.20	44.76
6	8.06		8.08	4.12	5.35	3.41	45.89
7	10.16		10.17	4.12	6.75	3.56	48.36
8	12.52		12.53	4.12	8.32	3.67	
9	15.14		15.14	4.12	10.05	3.75	
10	18.00		18.01	4.12	11.96	3.81	
11	21.13		21.14	4.12	14.03	3.85	
12	24.50		24.51	4.12	16.27	3.89	
13	28.13		28.13	4.12	18.68	3.92	
14	32.00		32.01	4.12	21.25	3.94	
15	36.12		36.13	4.12	23.99	3.96	

Table C.31 Drought return periods of Yeongwol 1 when severity exceeds 0.1

Duration (month)	T_D (year)	T_S (year)	T_{DS} (year)	T'_{DS} (year)	$T_{D S>s}$ (year)	$T_{S D>d}$ (year)	T_L (year)
1	2.16	1.90	2.16	1.90	1.54	1.54	1.47
2	2.82		2.82	1.90	1.54	1.54	4.98
3	3.62		3.62	1.90	1.54	1.54	5.63
4	4.57		4.57	1.90	1.56	1.54	6.05
5	5.73		5.73	1.90	1.63	1.54	10.27
6	7.14		7.14	1.90	1.78	1.54	11.93
7	8.83		8.83	1.90	2.02	1.57	13.54
8	10.88		10.88	1.90	2.37	1.63	
9	13.35		13.35	1.90	2.81	1.68	
10	16.32		16.32	1.90	3.37	1.72	
11	19.89		19.89	1.90	4.05	1.75	
12	24.18		24.18	1.90	4.88	1.77	
13	29.32		29.32	1.90	5.87	1.80	
14	35.46		35.46	1.90	7.07	1.81	
15	42.81		42.81	1.90	8.50	1.83	

Table C.32 Drought return periods of Yeongwol 1 when severity exceeds 0.2

Duration (month)	T_D (year)	T_S (year)	T_{DS} (year)	T'_{DS} (year)	$T_{D S>s}$ (year)	$T_{S D>d}$ (year)	T_L (year)
1	2.16	2.48	2.48	2.16	1.54	1.54	1.68
2	2.82		2.83	2.47	1.54	1.54	5.47
3	3.62		3.62	2.48	1.59	1.55	6.55
4	4.57		4.57	2.48	1.81	1.65	8.01
5	5.73		5.73	2.48	2.20	1.81	12.88
6	7.14		7.14	2.48	2.72	1.94	13.86
7	8.83		8.83	2.48	3.35	2.04	15.41
8	10.88		10.88	2.48	4.12	2.13	
9	13.35		13.35	2.48	5.05	2.19	
10	16.32		16.32	2.48	6.17	2.24	
11	19.89		19.89	2.48	7.52	2.28	
12	24.18		24.18	2.48	9.14	2.32	
13	29.32		29.32	2.48	11.08	2.35	
14	35.46		35.46	2.48	13.40	2.37	
15	42.81		42.81	2.48	16.18	2.39	

Table C.33 Drought return periods of Yeongwol 1 when severity exceeds 0.3

Duration (month)	T_D (year)	T_S (year)	T_{DS} (year)	T'_{DS} (year)	$T_{D S>s}$ (year)	$T_{S D>d}$ (year)	T_L (year)
1	2.16	3.25	3.25	2.16	1.54	1.54	1.95
2	2.82		3.28	2.80	1.58	1.60	6.18
3	3.62		3.70	3.18	1.91	1.87	8.37
4	4.57		4.59	3.24	2.41	2.15	11.77
5	5.73		5.74	3.25	3.01	2.37	15.74
6	7.14		7.14	3.25	3.75	2.55	16.82
7	8.83		8.83	3.25	4.64	2.68	16.77
8	10.88		10.88	3.25	5.72	2.79	
9	13.35		13.35	3.25	7.01	2.87	
10	16.32		16.32	3.25	8.57	2.94	
11	19.89		19.89	3.25	10.45	3.00	
12	24.18		24.18	3.25	12.70	3.04	
13	29.32		29.32	3.25	15.40	3.08	
14	35.46		35.47	3.25	18.63	3.11	
15	42.81		42.82	3.25	22.49	3.13	

Table C.34 Drought return periods of Yeongwol 1 when severity exceeds 0.4

Duration (month)	T_D (year)	T_S (year)	T_{DS} (year)	T'_{DS} (year)	$T_{D S>s}$ (year)	$T_{S D>d}$ (year)	T_L (year)
1	2.16	4.18	4.18	2.16	1.54	1.58	5.72
2	2.82		4.18	2.82	1.79	1.92	8.84
3	3.62		4.29	3.54	2.28	2.40	11.22
4	4.57		4.84	3.98	2.89	2.77	15.64
5	5.73		5.85	4.12	3.62	3.05	16.92
6	7.14		7.21	4.15	4.50	3.27	19.27
7	8.83		8.88	4.17	5.57	3.45	21.05
8	10.88		10.92	4.17	6.86	3.59	
9	13.35		13.39	4.17	8.42	3.69	
10	16.32		16.36	4.17	10.30	3.78	
11	19.89		19.93	4.18	12.55	3.85	
12	24.18		24.22	4.18	15.26	3.91	
13	29.32		29.36	4.18	18.50	3.96	
14	35.46		35.52	4.18	22.38	4.00	
15	42.81		42.87	4.18	27.01	4.03	

Table C.35 Drought return periods of Yeongwol 1 when severity exceeds 0.5

Duration (month)	T_D (year)	T_S (year)	T_{DS} (year)	T'_{DS} (year)	$T_{D S>s}$ (year)	$T_{S D>d}$ (year)	T_L (year)
1	2.16	5.25	5.25	2.16	1.57	1.73	8.99
2	2.82		5.25	2.82	1.99	2.39	11.86
3	3.62		5.29	3.60	2.55	3.01	14.02
4	4.57		5.56	4.36	3.23	3.48	18.21
5	5.73		6.29	4.85	4.05	3.84	18.72
6	7.14		7.50	5.07	5.04	4.11	20.96
7	8.83		9.10	5.16	6.24	4.33	25.61
8	10.88		11.11	5.20	7.68	4.50	
9	13.35		13.56	5.22	9.43	4.64	
10	16.32		16.53	5.23	11.53	4.75	
11	19.89		20.11	5.23	14.05	4.84	
12	24.18		24.41	5.24	17.08	4.91	
13	29.32		29.57	5.24	20.71	4.97	
14	35.46		35.75	5.24	25.05	5.02	
15	42.81		43.14	5.24	30.24	5.06	

Table C.36 Drought return periods of Yeongwol 1 when severity exceeds 0.6

Duration (month)	T_D (year)	T_S (year)	T_{DS} (year)	T'_{DS} (year)	$T_{D S>s}$ (year)	$T_{S D>d}$ (year)	T_L (year)
1	2.16	6.45	6.45	2.16	1.65	1.99	11.43
2	2.82		6.45	2.82	2.15	2.94	14.16
3	3.62		6.47	3.61	2.75	3.70	16.69
4	4.57		6.63	4.49	3.48	4.28	20.08
5	5.73		7.14	5.28	4.36	4.72	23.46
6	7.14		8.14	5.80	5.43	5.06	25.67
7	8.83		9.62	6.09	6.72	5.33	26.97
8	10.88		11.56	6.23	8.28	5.54	
9	13.35		13.99	6.31	10.16	5.71	
10	16.32		16.96	6.36	12.42	5.84	
11	19.89		20.56	6.39	15.14	5.95	
12	24.18		24.89	6.40	18.40	6.04	
13	29.32		30.10	6.42	22.31	6.11	
14	35.46		36.35	6.42	26.99	6.17	
15	42.81		43.81	6.43	32.58	6.22	

Table C.37 Drought return periods of Yeongwol 1 when severity exceeds 0.7

Duration (month)	T_D (year)	T_S (year)	T_{DS} (year)	T'_{DS} (year)	$T_{D S>s}$ (year)	$T_{S D>d}$ (year)	T_L (year)
1	2.16	7.78	7.78	2.16	1.73	2.33	12.79
2	2.82		7.78	2.82	2.26	3.54	16.19
3	3.62		7.80	3.61	2.90	4.47	19.58
4	4.57		7.91	4.53	3.67	5.16	24.37
5	5.73		8.30	5.48	4.60	5.69	25.99
6	7.14		9.14	6.28	5.72	6.10	28.93
7	8.83		10.49	6.83	7.08	6.42	31.52
8	10.88		12.35	7.17	8.72	6.68	
9	13.35		14.75	7.38	10.70	6.88	
10	16.32		17.72	7.50	13.09	7.05	
11	19.89		21.36	7.58	15.95	7.18	
12	24.18		25.76	7.63	19.39	7.29	
13	29.32		31.06	7.67	23.51	7.37	
14	35.46		37.41	7.70	28.44	7.45	
15	42.81		45.03	7.71	34.33	7.50	

Table C.38 Drought return periods of Yeongwol 1 when severity exceeds 0.8

Duration (month)	T_D (year)	T_S (year)	T_{DS} (year)	T'_{DS} (year)	$T_{D S>s}$ (year)	$T_{S D>d}$ (year)	T_L (year)
1	2.16	9.24	9.24	2.16	1.80	2.73	15.53
2	2.82		9.24	2.82	2.35	4.20	21.42
3	3.62		9.25	3.62	3.01	5.30	26.57
4	4.57		9.34	4.55	3.81	6.12	25.99
5	5.73		9.66	5.58	4.78	6.75	29.63
6	7.14		10.40	6.57	5.94	7.24	32.61
7	8.83		11.65	7.37	7.36	7.62	35.17
8	10.88		13.45	7.94	9.06	7.93	
9	13.35		15.83	8.33	11.12	8.17	
10	16.32		18.83	8.59	13.60	8.36	
11	19.89		22.53	8.76	16.57	8.52	
12	24.18		27.03	8.88	20.14	8.65	
13	29.32		32.46	8.96	24.42	8.75	
14	35.46		38.99	9.02	29.54	8.83	
15	42.81		46.82	9.07	35.67	8.90	

Table C.39 Drought return periods of Yeongwol 1 when severity exceeds 0.9

Duration (month)	T_D (year)	T_S (year)	T_{DS} (year)	T'_{DS} (year)	$T_{D S>s}$ (year)	$T_{S D>d}$ (year)	T_L (year)
1	2.16	10.81	10.81	2.16	1.85	3.17	20.89
2	2.82		10.81	2.82	2.42	4.91	27.72
3	3.62		10.82	3.62	3.10	6.20	31.23
4	4.57		10.90	4.56	3.92	7.16	32.79
5	5.73		11.19	5.63	4.92	7.90	34.59
6	7.14		11.87	6.74	6.12	8.47	36.21
7	8.83		13.06	7.74	7.57	8.92	36.44
8	10.88		14.83	8.55	9.33	9.28	
9	13.35		17.21	9.14	11.44	9.56	
10	16.32		20.26	9.57	13.99	9.79	
11	19.89		24.05	9.88	17.05	9.97	
12	24.18		28.68	10.10	20.73	10.12	
13	29.32		34.30	10.26	25.13	10.24	
14	35.46		41.06	10.38	30.41	10.34	
15	42.81		49.18	10.46	36.70	10.42	

Table C.40 Drought return periods of Yeongwol 1 when severity exceeds 1.0

Duration (month)	T_D (year)	T_S (year)	T_{DS} (year)	T'_{DS} (year)	$T_{D S>s}$ (year)	$T_{S D>d}$ (year)	T_L (year)
1	2.16	12.49	12.49	2.16	1.89	3.65	24.33
2	2.82		12.49	2.82	2.48	5.68	32.35
3	3.62		12.50	3.62	3.17	7.17	33.87
4	4.57		12.58	4.56	4.01	8.28	36.68
5	5.73		12.85	5.66	5.03	9.13	36.74
6	7.14		13.50	6.84	6.25	9.79	36.79
7	8.83		14.67	7.99	7.74	10.31	36.87
8	10.88		16.43	9.00	9.54	10.72	
9	13.35		18.85	9.81	11.70	11.05	
10	16.32		21.97	10.44	14.31	11.31	
11	19.89		25.88	10.91	17.44	11.52	
12	24.18		30.69	11.26	21.19	11.70	
13	29.32		36.53	11.52	25.70	11.83	
14	35.46		43.58	11.72	31.09	11.95	
15	42.81		52.05	11.88	37.53	12.04	

참고문헌

- 강인주, 윤용남 (2002) 가뭄관리를 위한 수문학적 의사결정에 관한 연구:
2. 가뭄관리를 위한 의사결정 방법. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제35권, 제5호, pp. 597-609.
- 경민수, 김상단, 김보경, 김형수 (2007) 군집분석을 통한 수문학적 가뭄의
가뭄심도-가뭄면적-가뭄지속기간 곡선의 작성. **대한토목학회논문집**,
대한토목학회, 제27권, 제3B호, pp. 267-276.
- 경민수, 이용원, 김형수, 김병식 (2009) 기후변화가 서울지역의 기온 및
가뭄에 미치는 영향 평가: AR4 SRES AR2 시나리오를 기반으로. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제29권, 제2B호, pp. 181-191.
- 곽재원, 김덕길, 이종소, 김형수 (2012) Copula 이론을 이용한 수문학적
가뭄 분석. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제32권, 제3B호, pp.
161-168.
- 권형중, 김성준 (2007) 국가 지하수 관측망 자료를 이용한 가뭄평가 방법
연구. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제27권, 제2B호, pp.
193-199.
- 권형중, 박현진, 홍대의, 김성준 (2006) SWSI 가뭄지수를 보완한 준분포
형 수문학적 가뭄평가 연구. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회,
제39권, 제8호, pp. 645-658.
- 김경덕, 허준행 (2000) 크기 및 기간차원에 의한 한강유역의 가뭄해석.
대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제20권, 제6B호, pp. 775-781.
- 김대하, 유철상 (2006) 가뭄심도-지속기간-빈도해석을 통한 우리나라 가
뭄의 공간분포 분석. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권,
제9호, pp. 745-754.
- 김보경, 김상단, 이재수, 김형수 (2006) 가뭄의 시공간적 분포 특성 연구:
가뭄심도-가뭄면적-가뭄지속기간 곡선의 작성. **대한토목학회논문집**,
대한토목학회, 제26권, 제1B호, pp. 69-78.
- 김수영, 조환범, 이승오, 최민하 (2010) KoFlux 타워에서 관측된 토양수
분 값을 이용한 가뭄지수 활용에 관한 연구. **대한토목학회논문집**, 대
한토목학회, 제30권, 제6B호, pp. 541-549.

- 김형수, 문장원, 김재형, 김종훈 (2000) 한강유역의 가뭄경향에 관한 연구. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제33권, 제4호, pp. 437-446.
- 김호성, 박진혁, 윤재영, 김상단 (2010) 극한가뭄의 시공간적 특성에 대한 기후변화의 영향을 평가하기 위한 SAD 곡선의 적용. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제30권, 제6B호, pp. 561-569.
- 류재희, 이동률, 안재현, 윤용남 (2002) 가뭄평가를 위한 가뭄지수의 비교 연구. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제35권, 제4호, pp. 397-410.
- 서형덕, 정상만, 김성준, 이주현 (2008) 수문학적 가뭄지수와 가상가뭄훈련에 의한 저수지의 최적 물 공급 방안 연구. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제10호, pp. 1045-1058.
- 신사철, 김철준 (2003) 우리 나라에서의 가뭄 발생 지역 판별을 위한 식생지수(NDVI)의 적용성에 관한 연구. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제5호, pp. 839-849.
- 연제문, 변성호, 이정규, 김태웅 (2007) 이차원 가뭄빈도해석을 통한 서울 지역의 가뭄평가. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제4호, pp. 335-343.
- 오태석, 문영일, 김성실, 박구순 (2011) 경계핵밀도함수를 이용한 기상학적 가뭄지수의 빈도해석. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제31권, 제2B호, pp. 87-98.
- 유지영, 김태웅, 김상단 (2010) 군집분석과 이변량 확률분포를 이용한 가뭄빈도해석. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제30권, 제6B호, pp. 599-606.
- 유지영, 최민하, 김태웅 (2010) 군집분석을 이용한 우리나라 가뭄특성의 공간적 분석. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제43권, 제1호, pp. 15-24.
- 유철상, 김대하 (2006) 구형펄스모형을 이용한 가뭄사상의 평가. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제4호, pp. 373-382.
- 유철상, 김대하, 김상단 (2006) EOF 해석 및 다변량시계열 모형을 이용한 농업가뭄 대비능력의 평가. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회

- 회, 제39권, 제7호, pp. 617-626.
- 유철상, 류소라 (2003) 서울지점 가뭄의 재현 및 지속특성 분석. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제4호, pp. 561-573.
- 유철상, 류소라, 김정환 (2002) 서울지점 월강수량 자료에 나타난 가뭄의 장기 재현특성. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제22권, 제3B호, pp. 281-289.
- 유철상, 안재현, 류소라 (2004) 포아송과정을 이용한 가뭄의 공간분포 분석. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제10호, pp. 813-822.
- 이광만, 차형선, 이승윤 (2008) 한강수계 장기 가뭄 수문시나리오 개발. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제6호, pp. 629-641.
- 이길성, 김상욱, 정은성 (2009) **저수유량의 빈도분석과 불확실성 산정을 위한 가이드라인**. 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단.
- 이길성, 진락선, 이상호, 이정민 (2005a) PCSWMM을 이용한 건천화 방지를 위한 유지용수의 공급 방안 (Ⅰ) 모형의 보정 및 검증. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제25권, 제6B호, pp. 431-436.
- 이길성, 진락선, 이상호, 이정민 (2005b) PCSWMM을 이용한 건천화 방지를 위한 유지용수의 공급 방안 (Ⅱ) 모형의 적용. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제25권, 제6B호, pp. 437-441.
- 이동률, 김웅태, 유철상 (2004) 기후변화가 기상학적 가뭄과 홍수에 미치는 영향. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제4호, pp. 315-328.
- 이동률, 문장원, 이대회, 안재현 (2006) 저수지 가뭄감시를 위한 물공급능력지수의 개발. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제3호, pp. 199-214.
- 이재웅, 김영아 (2004) 가뭄 예·경보에 의한 저수지 운영에 관한 연구. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제10호, pp. 837-844.
- 이재웅, 유재복 (2003) 유역 가뭄 예·경보 기법 개발. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제23권, 제6B호, pp. 499-506.
- 이주현, 정상만, 김성준, 이명호 (2006) 가뭄모니터링 시스템 구축: I. 정량적 가뭄모니터링을 위한 가뭄지수의 적용성 분석. **한국수자원학회**

- 논문집, 한국수자원학회, 제39권, 제9호, pp. 787-800.
- 이주현, 정상만, 김재한, 고양수 (2006) 가뭄모니터링 시스템 구축: II. 정량적 가뭄 모니터링 및 가뭄전망기법 개발. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제9호, pp. 801-812.
- 임경진, 심명필, 성기원, 이현재 (2001) 다양한 시계열을 이용한 가뭄지표 산정. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제34권, 제6호, pp. 673-685.
- 장연규, 김상단, 최계운 (2006) SPI 가뭄지수의 EOF 분석을 이용한 가뭄의 시공간적인 특성 연구. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제8호, pp. 691-702.
- 황태하, 김병식, 김형수, 서병하 (2006) SWAT 모형을 이용한 토양수분지수 산정과 가뭄감시. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제26권, 제4B호, pp. 345-354.
- Aghakouchak, A., Bardossy, A., and Habib, E. (2010) Conditional simulation of remotely sensed rainfall data using a non-Gaussian v-transformed copula. *Advances in Water Resources*, Vol. 33, pp. 624-634.
- Aghakouchak, A., Habib, E., and Bardossy, A. (2010) A comparison of three remotely sensed rainfall ensemble generators. *Atmospheric Research*, Vol. 98, pp. 387-399.
- Aghakouchak, A., Ciach, G., and Habib, E. (2010) Estimation of tail dependence coefficient in rainfall accumulation fields. *Advances in Water Resources*, Vol. 33, pp. 1142-1149.
- Ali, M.M., Mikhail, N.N., and Haq, M.S. (1978) A class of bivariate distributions including the bivariate logistic. *Journal of Multivariate Analysis*, Vol. 8, pp. 405-412.
- American Meteorological Society (2004) Statement on meteorological drought. *Bullitine of American Meteorological Society*, Vol. 85, pp. 1100-1109.
- Barros, A.P. and Bowden, G.J. (2008) Toward long-lead operational

- forecasts of drought: An experimental study in the Murray–Darling River Basin. *Journal of Hydrology*, Vol. 357, pp. 349–367.
- Beard, L.R. and Kubik, H.K. (1972) Drought severity and water supply dependability. *Journal of Irrigation and Drainage*, American Society of Civil Engineers, Vol. 98, pp. 433–442.
- Beersma, J.J. and Buishand, T.A. (2007) Drought in the Netherlands – Regional frequency analysis versus time series simulation. *Journal of Hydrology*, Vol. 347, pp. 332–346.
- Berg, D. (2009) Copula goodness-of-fit testing: An overview and power comparison. *European Journal of Finance*, Vol 15, pp. 675–701.
- Burke, E.J. and Brown, S.J. (2010) Regional drought over the UK and changes in the future. *Journal of Hydrology*, Vol. 394, pp. 471–485.
- Burke, E.J., Perry, R.H.J., and Brown, S.J. (2010) An extreme value analysis of UK drought and projections of change in the future. *Journal of Hydrology*, Vol. 388, pp. 131–143.
- Cancelliere, A. and Salas, J.D. (2004) Drought length properties for periodic-stochastic hydrologic data. *Water Resources Research*, Vol. 40, W02503.
- Cancelliere, A. and Salas, J.D. (2010) Drought probabilities and return period for annual streamflows series. *Journal of Hydrology*, Vol. 391, pp. 77–89.
- Chang, T.J. (1991) Investigation of precipitation droughts by use of kriging method. *Journal of Irrigation and Drainage*, American Society of Civil Engineers, Vol, 117, No. 6, pp. 935–943.
- Chang, T.J. and Stenson, J.R. (1990) Is it realistic to define a 100-year drought for water management? *Water Resources Bulletin*, Vol. 26, No. 5, pp. 823–829.
- Chen, L., Singh, V.P., and Guo, S. (2011) Drought analysis based on copulas. *2011 Symposium on Data-Driven Approaches to Droughts*, Paper 45.

- Cherubini, U., Luciano, E., and Vecchiato, W. (2004) *Copula Methods in Finance*. Wiley, New York.
- Clausen, B. and Pearson, C.P. (1995) Regional frequency analysis of annual maximum streamflow drought. *Journal of Hydrology*, Vol. 173, pp. 111–130.
- Cordery, I. and McCall, M. (2000) A model for forecasting drought from teleconnections. *Water Resources Research*, Vol. 36, No. 3, pp. 763–768.
- De Michele, C. and Salvadori, G. (2003) A generalized Pareto intensity-duration model of storm rainfall exploiting 2-copulas. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, Vol. 108, pp. 4067.
- De Michele, C., Salvadori, G., Canossi, M., Petaccia, A., and Rosso, R. (2005) Bivariate statistical approach to check adequacy of dam spillway. *Journal of Hydrological Engineering*, Vol. 10, No. 1, pp. 50–57.
- De Michele, C., Salvadori, G., Passoni, G., and Vezzoli, R. (2007) A multivariate model of sea storm using copulas. *Coastal Engineering*, Vol. 54, pp. 734–751.
- Dracup, J.A., Lee, K.S., and Paulson, E.G. (1980a) On the definition of droughts. *Water Resources Research*, Vol. 16, No. 2, pp. 297–302.
- Dracup, J.A., Lee, K.S., and Paulson, E.G. (1980b) On the statistical characteristics of drought events. *Water Resources Research*, Vol. 16, No. 2, pp. 289–296.
- Dunbar, J.A., Allen, P.M., and Bennett, S.J. (2010) Effect of multiyear drought on upland sediment yield and subsequent impacts on flood control reservoir storage. *Water Resources Research*, Vol. 46, W05526.
- Eltahir, E.A.B. (1992) Drought frequency analysis in Central and Western Sudan. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 37, No. 3, pp. 185–199.
- Embrechts, P., Lindskog, F., and McNeil, A.J. (2003) Modelling

- dependence with the copulas and applications to risk management. *Handbook of Heavy Tailed Distributions in Finance*, S.T. Rachen, Elsevier Science, Amsterdam, The Netherlands.
- Environment Agency (2008) *Water Resources Planning Guideline*.
- Favre, A.-C., El Adlouni, S., Perreault, L., Thiémonge, N., and Bobee, B. (2004) Multivariate hydrological frequency analysis using copulas. *Water Resources Research*, Vol. 40, W01101.
- Fernandez, C., Vega, J.A., Funturbel, T., and Jimenez, E. (2009) Streamflow drought time series forecasting: A case study in a small watershed in north west Spain. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 23, pp. 1063–1070.
- Fiorillo, F. (2009) Spring hydrographs as indicators of drought in a karst environment. *Journal of Hydrology*, Vol. 373, pp. 290–301.
- Fisher, R.A. (1912) On an absolute criterion for fitting frequency curves. *Messenger of Mathematics*, Vol. 31, pp. 155–160.
- Food and Agriculture Organization (1983) Guidelines: Land evaluation for rainfed agriculture. *Food and Agriculture Organization Soils Bulletin*, Vol. 52, Rome.
- Fowler, H.J. and Kilsby, C.G. (2002) A weather-type approach to analysing water resource drought in the Yorkshire region from 1881 to 1998. *Journal of Hydrology*, Vol. 262, pp. 177–192.
- Frick, D.M., Bode, D., and Salas, J.D. (1990) Effect of drought on urban water supplies. I: Drought analysis. *Journal of Hydrological Engineering*, Vol. 116, pp. 733–753.
- Gonzalez, J. and Valdes, J.B. (2006) New drought frequency index: Definition and comparative performance analysis. *Water Resources Research*, Vol. 42, W11421.
- Ghosh, S. and Mujumdar, P.P. (2007) Nonparametric methods for modeling GCM and scenario uncertainty in drought assessment. *Water Resources Research*, Vol. 43, W07405.
- Grimaldi, S. and Seinaldi, F. (2006) Asymmetric copula in multivariate

- flood frequency analysis. *Advances in Water Resources*, Vol. 29, pp. 1155–1167.
- Gumbel, E.J. (1963) Statistical forecast of droughts. *Bulletin of the International Association of Scientific Hydrology*, Vol. 8, No. 1, pp. 5–23.
- Gupta, V.K. and Duckstein, L. (1975) A stochastic analysis of extreme droughts. *Water Resources Research*, Vol. 11, No. 2, pp. 221–228.
- Havens, A.V. (1954) Drought and agriculture. *Weatherwise*, Vol. 7, pp. 51–55.
- Herbst, P.H., Brendenkamp, D.B., and Barke, H.M. (1966) A technique in the evaluation of drought from rainfall data. *Journal of Hydrology*, Vol. 4, No. 3, pp. 264–272.
- Hisdal, H. and Tallaksen, L.M. (2003) Estimation of regional meteorological and hydrological drought characteristics: A case study for Denmark. *Journal of Hydrology*, Vol. 281, pp. 230–247.
- Hisdal, H., Tallaksen, L.M., Clausen, B., Peters, E., and Gustard, A. (2004) Hydrological drought characteristics. In: *Hydrological Drought – Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater*, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, pp. 139–182.
- Hosking, J.R.M. (1990) L-moments: Analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics. *Journal of the Royal Statistical Society*, Vol. 52, pp. 105–124.
- Huang, W.-C. and Yuan, L.-C. (2004) A drought early warning system on real-time multireservoir operations. *Water Resources Research*, Vol. 40, W06401.
- Jaranilla-Sanchez, P.A., Wang, L., and Koike, T. (2011) Modeling the hydrologic responses of the Pampnga River basin, Philipines: A quantitative approach for identifying droughts. *Water Resources Research*, Vol. 47, W03514.
- Joe, H. (1997) *Multivariate Models and Dependence Concepts*.

- Chapman and Hall, London.
- Kao, S.-C. and Govindaraju, R.S. (2010) A copula-based joint deficit index for droughts. *Journal of Hydrology*, Vol. 380, pp. 121-134.
- Kasprzyk, J.R., Reed, P.M., Kirsch, B.R., and Characklis, G.W. (2009) Managing population and drought risks using many-objective water portfolio planning under uncertainty. *Water Resources Research*, Vol 45, W12401.
- Kendall, D.R. and Dracup, J.A. (1992) On the generation of drought events using an alternating renewal-reward model. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, Vol. 6, pp. 55-68.
- Keyantash J. and Dracup, J.A. (2002) The quantification of drought: An evaluation of drought indices. *American Meteorological Society*, Vol. 83, No. 8, pp. 1167-1180.
- Keyantash J. and Dracup, J.A. (2004) An aggregate drought index: Assessing drought severity based on fluctuations in the hydrologic cycle and surface water storage." *Water Resources Research*, Vol. 40, No. 9, W09304.
- Kim, D.-W., Byun, H.-R., and Choi, K.-S. (2009) Evaluation, modification, and application of the effective drought index to 200-Year drought climatology of Seoul, Korea. *Journal of Hydrology*, Vol. 378, pp. 1-12.
- Kjeldsen, T.R., Lundorf, A., and Rosbjerg, D. (2000) Use of a two-component exponential distribution in partial duration modelling of hydrological droughts in Zimbabwean rivers. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 45, No. 2, pp. 285-298.
- Leblanc, M.J., Tregoning, P., Ramillien, G., Tweed, S.O., and Fakes, A. (2009) Basin-scale, integrated observations of the early 21st century multiyear drought in southeast Australia. *Water Resources Research*, Vol. 45, W04408.
- Lee, K.S. (1987) An approach for frequency analysis of multiyear drought magnitude and severity. *Journal of Korean Society of Civil*

- Engineers*, Vol. 7, No. 1, pp. 111–120.
- Lee, K.S. (2000) *Fundamentals of Water Resource Systems*. SaeRon Publishing Co, Seoul.
- Lee, K.S., Sadeghipour, J., and Dracup, J.A. (1986) An approach of frequency analysis of multiyear drought durations. *Water Resources Research*, Vol. 22, No. 5, 5W4176.
- Leonard, M., Metcalfe, A., and Lambert, M. (2008) Frequency analysis of rainfall and streamflow extremes accounting for seasonal and climatic partitions. *Journal of Hydrology*, Vol. 348, pp. 135–147.
- Li, D.-Q., Tang, X.-S., Phoon, K.-K., Chen, Y.-F., and Zhou, C.-B. (2011) Bivariate simulation using copula and its application to probabilistic pile settlement analysis. *International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Published online in Wiley Online Library.
- Linsley, R.K., Jr., Kohler, M.A., and Paulhus, J.C.H. (1975) *Hydrology for Engineers*. 2nd Edition, McGraw-Hill, New York.
- Linsley, R.K., Jr., Kohler, M.A., and Paulhus, J.C.H. (1959). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill, New York.
- Loaiciga, H.A. (2005) On the probability of droughts: The compound renewal model. *Water Resources Research*, Vol. 41, W01009.
- Lopez-Moreno, J.I., Vicente-Serrano, S.M., Begueria, S., Garcia-Ruiz, J.M., Portela, M.M., and Almeida, A.B. (2009) Dam effects on droughts magnitude and duration in a transboundary basin: The Lower River Tagus, Spain and Portugal. *Water Resources Research*, Vol. 45, W02405.
- Lorenzo-Lacruz, J., Vicente-Serrano, S.M., Lopez-Moreno, J.I., Begueria, S., Garcia-Ruiz, J.M., and Cuadrat, J.M. (2010) The impact of droughts and water management on various hydrological systems in the headwaters of the Tagus River (central Spain). *Journal of Hydrology*, Vol. 386, pp. 13–26.
- Madsen, H. and Rosbjerg, D. (1995) On the modelling of extreme

- droughts. In: *Modelling and Management of Sustainable Basin-scale Water Resources Systems*, IAHS Publication No. 231, pp. 377–385.
- Mathier, L., Perreault, L., and Bobee, B. (1992) The use of geometric and gamma related distributions for frequency analysis of water deficit. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, Vol. 6, pp. 239–254.
- MathWave Technologies (2004) www.mathwave.com
- McKee, T.B., Doeskin, N.J., and Kleist, J. (1993) The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, Anaheim, California, pp. 179–184.
- Meigh, J., Tate, E., and McCartney, M. (2002) Methods for identifying and monitoring river flow drought in southern Africa. In: Van Lanen and Demuth (2002) – *Regional Hydrology: Bridging the Gap Between Research and Practice*, IAHS Publication No. 274, pp. 181–188.
- Mendicino, G., Senatore, A., and Versace, P. (2008) A Groundwater Resource Index (GRI) for drought monitoring and forecasting in a mediterranean climate. *Journal of Hydrology*, Vol. 357– pp. 282–302.
- Mirakbari, M., Ganji, A., and Fallah, S.R. (2010) Regional bivariate frequency analysis of meteorological droughts. *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 15, No. 12, pp. 985–1000.
- Mishra, A.K. and Desai, V.R. (2005) Drought forecasting using stochastic models. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 19, pp. 326–339.
- Mishra, A.K. and Singh, V.P. (2010) A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*. Vol. 391, pp. 202–216.
- Mohan, S. and Rangacharya, N.C.V. (1991) A modified method for drought identification. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 36, No. 1, pp. 11–21.
- Moreira, E.E., Coelho, C.A., Paulo, A.A., Pereira, L.S., and Mexia, J.T.

- (2008) SPI-based drought category prediction using loglinear models. *Journal of Hydrology*, Vol. 354, pp. 116–130.
- Moreira, E.E., Paulo, A.A., Pereira, L.S., and Mexia, J.T. (2006) Analysis of SPI drought class transitions using loglinear models. *Journal of Hydrology*, Vol. 331, pp. 349–359.
- Nadarajah, S. (2007) A bivariate gamma model for drought. *Water Resources Research*, Vol. 43, W08501.
- Ozger, M., Mishra, A.K., and Singh, V.P. (2009) Low frequency drought variability associated with climate indices. *Journal of Hydrology*, Vol. 364, pp. 152–162.
- Ochoa-Rivera, J.C. (2008) Prospecting droughts with stochastic artificial neural networks. *Journal of Hydrology*, Vol. 352, pp. 174–180.
- Palmer, W.C. (1965) Meteorological drought. *Weather Bureau, Research Paper No. 45*, pp. 58.
- Panda, D.K., Mishra, A., Jena, S.K., James, B.K., and Kumar, A. (2007) The influence of drought and anthropogenic effects on groundwater levels in Orissa, India. *Journal of Hydrology*, Vol. 343, pp. 140–153.
- Pandey, R.P., Mishra, S.K., Singh, R., and Ramasastri, K.S. (2008) Streamflow drought severity analysis of Betwa River system (India). *Water Resources Management*, Vol. 22, pp. 1127–1141.
- Park, J.-S. (2005) Wakeby distribution and the maximum likelihood estimation algorithm in which probability density function is not explicitly expressed. *The Korean Communications in Statistics*, Vol. 12, No. 2, pp. 443–451.
- Peters, E., Bier, G., van Lanen, H.A.J., and Torfs, P.J.J.F. (2006) Propagation and spatial distribution of drought in a groundwater catchment. *Journal of Hydrology*, Vol. 321, pp. 257–275.
- Peters, E., van Lanen, H.A.J., Torfs, P.J.J.F., and Bier, G. (2005) Drought in groundwater – Duration distribution and performance

- indicators. *Journal of Hydrology*, Vol. 306, pp. 302–317.
- Pinkeye, S. (1966) Conditional probabilities of wet and dry years over a large continental area. *Hydrology Paper No. 12*, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- Pinya, M.A.S., Madsen, H., and Rosbjerg, D. (2009) Assessment of the risk of inland flooding in a tidal sluice regulated catchment using multi-variate statistical techniques. *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 34, pp. 662–669.
- Price, K., Rhett Jackson, C., Parker, A.J., Reitan, T., Dowd, J., and Cyterski, M. (2011) Effects of watershed land use and geomorphology on stream low flows during severe drought conditions in the southern Blue Ridge Mountains, Georgia and North Carolina, United States. *Water Resources Research*, Vol. 47, W02516.
- Querner, E.P. and van Lanen, H.A.J. (2001) Impact assessment of drought mitigation measures in two adjacent Dutch basins using simulation modelling. *Journal of Hydrology*, Vol. 252, pp. 51–54.
- Reddy, M.J. and Ganguli, P. (2011) Application of copulas for derivation of drought severity–duration–frequency curves. *Hydrological Processes*, Published online on Wiley Online library.
- Renard, B. and Lang, M. (2007) Use of Gaussian copula for multivariate extreme value analysis: Some case studies in hydrology. *Advances in Water Resources*, Vol. 30, pp. 897–912.
- Salvadori, G. and De Michele, C. (2004a) Analytical calculation of storm volume statistics involving Pareto-like intensity–duration marginals." *Geophysical Research Letters*, Vol. 31, L04502.
- Salvadori, G. and De Michele, C. (2004b) Frequency analysis via copulas: Theoretical aspects and applications to hydrological events. *Water Resources Research*, Vol. 40, W12511.
- Salvadori, G. and De Michele, C. (2006) Statistical characterization of temporal structure of storms. *Advances in Water Resources*, Vol.

- 29, No. 6, pp. 827-842.
- Salvadori, G. and De Michele, C. (2007) On the use of copulas in hydrology: Theory and practice. *Journal of Hydrological Engineering*, Vol. 12, No. 4, pp. 369-380.
- Santos, J.F., Pulido-Calvo, I., and Portela, M.M. (2010) Spatial and temporal variability of droughts in Portugal. *Water Resources Research*, Vol. 46, W03503.
- Santos, M.A. (1983) Regional droughts: A stochastic characterization. *Journal of Hydrology*, Vol. 66, pp. 183-211.
- Schneider, S.H. (1996) *Encyclopedia of Climate and Weather*. Oxford University Press, New York.
- Schweizer, B. and Sklar, A. (1983) *Probabilistic Metric Spaces*. North-Holland, New-York.
- Sen, Z. (1980) Statistical analysis of hydrologic critical droughts. *Journal of Hydraulic Division*, American Society of Civil Engineers, Vol. 106, No. 1, pp. 99-115.
- Shiau, J.-T. (2006) Fitting drought duration and severity with two-dimensional copulas. *Water Resources Management*, Vol. 20, pp. 795-815.
- Shiau, J.-T., Feng, S., and Nadarajah, S. (2007) Assessment of hydrological droughts for the Yellow River, China, using copulas. *Hydrological Processes*, Vol. 21, pp. 2157-2163.
- Shiau, J.-T. and Modarres, R. (2009) Copula-based drought severity-duration-frequency analysis in Iran. *Meteorological Applications*, Vol. 16, pp. 481-489.
- Shiau, J.-T. and Shen, H.W. (2001) Recurrence analysis of hydrologic droughts of differing severity. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 127, No. 1, pp. 30-40.
- Sklar, K. (1959) Fonctions de repartition a n dimensions et leurs marges. *Publications de l'Institut de Statistique de L'Universite de Paris*, No. 8, pp. 229-231.

- Stahl, K. (2001) Hydrological drought – A study across Europe. PhD Thesis Albert-Ludwigs Universitat Freiburg, *Freiburger Schriften zur Hydrologie*, No. 15, Freiburg, Germany.
- Sturges, H. (1926) The choice of a class interval. *Journal of American Statistical Association*, Vol. 21, pp. 65–66.
- Tallaksen, L.M., Hisdal, H., and van Lanen, H.A.J. (2009) Space-time modelling of catchment scale drought characteristics. *Journal of Hydrology*, Vol. 375, pp. 363–372.
- Tallaksen, L.M., Madsen, H., and Clausen, B. (1997) On the definition and modelling of streamflow drought duration and deficit volume. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 42, No. 1, pp. 15–33.
- Tallaksen, L.M. and van Lanen, H.A.J. (2004) *Hydrological Drought – Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Tang, C. and Piechota, T.C. (2009) Spatial and temporal soil moisture and drought variability in the Upper Colorado River Basin. *Journal of Hydrology*, Vol. 379, pp. 122–135.
- Tate, E.L. and Freeman, S. (2000) Three modelling approaches for seasonal streamflow droughts in southern Africa: The use of censored data. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 45, No. 1, pp. 27–42.
- Tweed, S., Leblanc, M., and Cartwright, I. (2009) Groundwater-surface water interaction and the impact of a multi-year drought on lakes conditions in South-East Australia. *Journal of Hydrology*, Vol. 379, pp. 41–53.
- UN Secretariat General (1994) General Assembly. *Intergovernmental Negotiating Committee for the Elaboration of an International Convention to Combat Desertification in Those Countries Experiencing Serious Drought and/or Desertification, Particularly in Africa*, Paris.
- Villarini, G., Serinaldi, F., and Krajewski, W.F. (2008) Modeling

- radar-rainfall estimation uncertainties using parametric and non-parametric approaches. *Advances in Water Resources*, Vol. 31, pp. 1674–1686.
- Wang, X., Gebremichael, M., and Yan, J. (2010) Weighted likelihood copula modeling of extreme rainfall events in Connecticut. *Journal of Hydrology*, Vol. 390, pp. 108–115.
- WGA (2004) Creating a drought early warning system for the 21st century – The national integrated drought information system. *Western Governors' Association*, Denver, Colorado.
- Whipple, W., Jr. (1966) Regional drought frequency analysis. *Journal of Irrigation and Drainage*, American Society of Civil Engineers, Vol. 92, No. 2, pp. 11–31.
- Wilhite, D.A. and Glantz, M.H. (1985) Understanding the drought phenomenon: The role of definition. *Water International*, Vol. 10, pp. 111–120.
- Wise, E.K. (2010) Tree ring record of streamflow and drought in the upper Snake River. *Water Resources Research*, Vol. 46, W11529.
- Wong, G., Lambert, M.F., Leonard, M., and Metcalfe, A.V. (2010) Drought analysis using trivariate copulas conditional on climatic states. *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 129–141.
- Woo, M.-K. and Tarhule, A. (1994) Streamflow droughts of northern Nigerian rivers. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 39, No. 1, pp. 19–34.
- World Meteorological Organization (1975) Drought and agriculture. *Technical Note No. 138*, Report of the CAgM Working Group on Assessment of Drought, Geneva, Switzerland, pp. 127.
- Yevjevich, V. (1967) An objective approach to definitions and investigation of continental hydrologic droughts. *Hydrology Paper No. 23*, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- Yoo, C., Kim, D., Kim, T.-W., and Hwang, K.-N. (2008) Quantification

- of drought using a rectangular pulses Poisson process model. *Journal of Hydrology*, Vol. 355, pp. 34-48.
- Zelenhasic, E. and Salvai, A. (1987) A method of streamflow analysis. *Water Resources Research*, Vol. 23, pp. 156-168.
- Zhang, L. and Singh, V.P. (2006) Bivariate flood frequency analysis using copula method. *Journal of Hydrological Engineering*, Vol. 11, No. 2, pp. 150-164.
- Zhang, L. and Singh, V.P. (2007a) Gumbel-Hougaard copula for trivariate rainfall frequency analysis. *Journal of Hydrological Engineering*, Vol. 12, No. 4, pp. 409-419.
- Zhang, L. and Singh, V.P. (2007b) Trivariate flood frequency analysis using the Gumbel-Hougaard copula. *Journal of Hydrological Engineering*, Vol. 12, No. 4, pp. 431-439.
- Zhang, L. and Singh, V.P. (2007c) Bivariate rainfall frequency distributions using Archimedean copulas. *Journal of Hydrology*, Vol. 332, pp. 93-109.
- Zhang, Q., Chen, Y.D., Chen, X., and Li, J. (2011) Copula-based analysis of hydrological extremes and implications of hydrological behaviors in the Pearl basin, China. *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 16, No. 7, pp. 598-607.
- Zierl, B. (2001) A water balance model to simulate drought in forested ecosystems and its application to the entire forested area in Switzerland. *Journal of Hydrology*, Vol. 242, pp. 115-136.

Abstract of Thesis

Frequency Analysis of Streamflow Drought Using Copula: Duration - Severity

by

Song, Jae Yeol

Master of Science in Engineering
Seoul National University, 2012

Professor Kil Seong Lee, Advisor

Drought is a disaster due to the lack of water which has impacts on the human society and environment. Generally, shortage of rainfall, streamflow, and soil moisture are meteorological drought, hydrological drought, and agricultural drought respectively. And unlike floods, drought influences broader areas and has larger damages. For these reasons, drought analysis is related to the functional field of water resources management and is important in controlling the water.

Researches about drought, for example, definitions, frequency analysis, new indexes, and forecast from monitoring were studied for a long time. Recently, copulas are used in frequency analysis of

extreme values for natural phenomena like floods and droughts. In multivariate drought frequency analysis, copula has the advantages of considering drought duration and drought severity as random variables and can obtain the joint cumulative distribution function (CDF) with the marginal CDFs. Therefore, the objective of this study is a bivariate (duration and severity) frequency analysis of drought based on copula, and compare it with the low flow frequency analysis.

Streamflow data from 4 gauge stations of the upstream region of the South Han River were used to analyse hydrological drought. Magnitude of monthly streamflows were standardized and therefore the standardized severity is used in this study. Threshold level method based on crossing theory and pooling procedure were used to calculate the drought duration and the standardized drought severity. Chi-squared test, Kolmogorov-Smirnov test, and Anderson-Darling test were used to examine the goodness-of-fit of the probability distributions for the calculated drought duration and standardized drought severity. Pareto and GEV distributions were selected for the drought duration, lognormal and GEV distributions were selected for the standardized drought severity, respectively. L-moment was used to estimate the parameters of the selected probability distributions. Akaike's Information Criterion (AIC) was used on the selection of copula and method of Inference Function for Margins (IFM) was used to estimate the copula parameter. By using the copula theory, 4 joint CDFs of drought duration and standardized drought severity for each sites were obtained.

The conditional return periods of standardized drought severity given drought duration based on copula were compared to the results

from the low flow frequency analysis. Low flow frequency analysis considers duration as a parameter while bivariate frequency analysis based on copula considers duration as a random variable. Low flow frequency analysis shows the relationship of magnitude, duration, and frequency and thus the magnitude needs to be converted to severity to compare it with the drought severity. As compared to the copula based frequency analysis, Return periods from low flow frequency analysis are under-estimated when drought duration and standardized drought severity are shorter and smaller than 7 ~ 10 months and 2.5 ~ 3.5. On the contrary, return periods, compared to those of copula, from low flow frequency analysis are over-estimated when drought duration and standardized severity are longer and larger than 7 ~ 10 months and 2.5 ~ 3.5.

Actually, there was a severe historical drought in the region in the year 2008. By comparing the calculated drought events at 4 sites, it was found that the drought occurred at the same time, the duration was 12 months, and the average of the standardized severity was 3.24. By the bivariate frequency analysis based on copula, the return period was calculated to be approximately 70 years.

Using copula for drought frequency analysis are more complex in the procedure but has more reasonable results than the low flow frequency analysis. SDF (Severity-Duration-Frequency) curves were drawn by the conditional return period of standardized drought severity given drought duration based on copula and were compared with the low flow frequency curves. By the SDF curves, we can obtain a more reasonable return period of the drought duration and standardized drought severity. Also, SDF curves can

be used in designing hydraulic structures and maintaining instream flows.

keywords: copula, hydrological drought, frequency analysis, duration,
severity

Student Number: 2010-20947

감사의 글

2012년, 공학석사학위논문을 쓰면서 연구뿐만 아니라 인생 그리고 자신에 대해 많은 것을 생각하고 느끼며 감사의 글을 씁니다.

항상 부족한 저를 자식처럼 해주며 학업, 인생, 그리고 일상 속에서 쉽게 놓치고 지나갈수 있는 세세한 부분까지 지도해주신 이길성 교수님께 가장 먼저 감사드립니다. 자주 뵙지 못하였지만 너그러우신 서경덕 교수님, 저를 오송 콤피로 기억하고 관심과 격려로 항상 해주신 서일원 교수님, 저를 지도학생처럼 대해 주시며 저의 부족한 부분을 일깨워주신 김영오 교수님, 그리고 학생들과 함께 지내며 공부와 연구의 즐거움을 느끼게 해준 김영한 교수님께 감사드립니다. 교수님들의 깊은 관심과 지도에 은혜와 존경의 마음을 표하며, 깊이 감사드립니다. 또한, 학부때 지도와 가르침 주신 이송 교수님, 임성순 교수님, 조용준 교수님, 이창수 교수님, 문영일 교수님, 그리고 이수곤 교수님께도 감사드립니다.

대학원에 진학하면서 함께 시간을 보낸 선후배 동기들에게도 감사의 말을 전하고 싶습니다. 조연을 아끼지 않으며 많은 도움을 주고 지금은 교수님인 은성이형, 항상 공간과 시간을 함께 공유하며 정든 기두형, 지금은 열심히 일하고 있는 진호형, 홍일점 우연누나, 힘들 때마다 격려해준 진영이형, 해결사 원구형, 매번 귀중한 정보와 격려를 준 상근이형, 그리고 첫 학기에 정신적으로 많은 도움을 준 경신이형, 원표형, 경태형에게 감사의 마음을 전합니다.

수공학 연구실에서 저를 챙겨주신 장현이형, 재경이형, 태호형, 국현이형, 승우형, 기덕이형, 세현이형, 창근이형, 성은이형, 성원이형, 황정이형에게 감사의 마음 전하고 싶습니다. 지금은 각자의 길을 걷고 있는 형윤이, 준형이, 인환이, 영재, 재현이형, 민석이, 소연이에게도 고마운 마음을 전합니다. 또한 지금 열심히 생활하고 있는 태훈이, 대웅이, 남훈이, 초롱이누나, 수웅이, 영호, 영, 주하, 선영이, 현수, 수연이에게도 감사의 마음을 표현합니다.

캐나다, 동두천, 태백, 경기도, 지방에 뿔뿔이 흩어진 스타디 요원들, 연락 자주 못한 개회원들, 말, 너구리, 주똥, 운서, 영롱이, 윤희에게도 고마운 마음을 전하고 싶고, 감사의 글에 없는 분들에게도 감사의 마음 전합니다.

마지막으로 사랑하는 가족들에게 감사드리며 감사의 글을 마칩니다.